



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Metodología de optimización del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas

Ing. Julián David Vega Hincapié

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia

2017

Metodología de optimización del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas

Ing. Julián David Vega Hincapié

Trabajo final de maestría en perfil de profundización presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica

Director:

Ing. Javier Gustavo Herrera Murcia. PhD.

Línea de Investigación:

Alta Tensión

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2017

Cuestión de actitud...

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional de Colombia por sentar las bases de mi formación y permitir que alcance mis metas profesionales.

A Ingeniería Especializada S.A. por aportar la experiencia técnica en el tema.

Al profesor Javier Herrera por su ayuda, disciplina y constante exigencia.

A mi familia por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A mis amigos de toda la vida por su compañía y buena energía en el camino.

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología de optimización enfocada en los parámetros del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra para cada una de las estructuras en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas. Inicialmente, se determinan los criterios de optimización técnicos y económicos de los parámetros en estudio como punto de partida de la metodología de optimización. Posteriormente, se determina el desempeño de las líneas de transmisión con relación a las fallas provocadas por descargas eléctricas atmosféricas considerando las variaciones topológicas y ambientales a lo largo de su recorrido a partir de una metodología de simulación basada en modelos matemáticos. Estos modelos incluyen, una rutina basada en el método de Monte Carlo para la generación de los puntos de impacto y los parámetros de las descargas, el modelo electrogeométrico para su clasificación como impactos directos y el programa ATP/EMTP para el cálculo de las sobretensiones generadas, entre otros. Con base en estos aspectos, se formula rigurosamente el problema de optimización con su respectiva simplificación y con base en esta formulación se seleccionan, proponen e implementan los métodos de optimización de Nelder-Mead modificado y heurístico a incluir en la metodología de optimización. Finalmente, se estudian una serie de casos con el fin de validar cada uno de los elementos utilizados en la metodología de optimización propuesta y la metodología por completo. Con base en lo anterior, se demuestra que la metodología de optimización propuesta obtiene resultados válidos en términos de la reducción de costos computacionales y económicos de las soluciones generadas.

Palabras clave: Metodología, optimización, nivel de aislamiento eléctrico, resistencia de puesta a tierra, líneas de transmisión, descargas eléctricas atmosféricas.

Abstract

This work presents an optimization methodology focused on the parameters of the electrical insulation level and grounding resistance for the structures present in transmission lines in relation to their lightning performance. Initially, the technical and economic optimization criteria of the parameters under study are determined as the starting point of the optimization methodology. Later, the performance of the transmission lines in relation to the failures caused by lightning is determined considering the topological and environmental variations along its route by means of a simulation methodology based on mathematical models. These models include, a routine based on the Monte Carlo method for the generation of the impact location and parameters of lightning flashes, the electrogeometric model for its classification and the ATP/EMTP program for the calculation of the overvoltages generated, among others. The optimization problem is rigorously formulated with its respective simplification and based on this formulation the Nelder-Mead modified and heuristic optimization methods are selected, proposed and implemented to be included in the optimization methodology. Finally, in order to validate each elements used in the proposed optimization methodology and the methodology altogether, a series of cases are studied. Based on the above, it is shown that the proposed optimization methodology obtains valid in terms of the computational and economic cost reduction of the generated solutions.

Keywords: Methodology, optimization, electrical insulation level, grounding resistance, transmission lines, lightning strikes.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
1. Generalidades	5
1.1 Marco teórico y antecedentes	5
1.1.1 Nivel de aislamiento eléctrico	5
1.1.2 Resistencia de puesta a tierra	7
1.1.3 Tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas.....	9
1.1.4 Desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas.....	10
1.1.5 Optimización de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas.....	12
1.2 Justificación	13
1.3 Criterios técnicos y económicos a tener en cuenta en este trabajo	14
1.3.1 Elementos generales de la línea de transmisión	14
1.3.2 Tasa de fallas por descarga eléctrica atmosférica	17
1.3.3 Nivel de aislamiento eléctrico	17
1.3.4 Resistencia de puesta a tierra	18
1.4 Planteamiento de la metodología de optimización	19
2. Desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas	23
2.1 Generación aleatoria de las descargas eléctricas atmosféricas	26
2.1.1 Definición del área de trabajo.....	26
2.1.2 Definición de la cantidad de descargas	27
2.1.3 Selección de las distribuciones de probabilidad de amplitud y tiempo de frente de la corriente, y de la posición de la descarga con respecto a la línea... ..	28
2.1.4 Variación aleatoria de los parámetros – Método de Monte Carlo	30
2.2 Discriminación de las descargas que corresponden a impactos directos	32
2.3 Cálculo de sobretensiones en el ATP/EMTP	36
2.3.1 Fuentes de impulso para rayo	38
2.3.2 Vanos.....	38
2.3.3 Estructuras.....	39
2.3.4 Cadena de aisladores	40

X Metodología de optimización del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas

2.3.5	Puesta a tierra	41
2.3.6	Otros.....	42
2.4	Cálculo de la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas.....	42
3.	Formulación del problema de optimización.....	45
3.1	Planteamiento del problema de optimización inicial.....	45
3.1.1	Función de costo	46
3.1.2	Variables.....	47
3.1.3	Restricciones	47
3.1.4	Espacio de búsqueda	48
3.2	Selección del método de optimización.....	49
3.2.1	Simplificación del problema de optimización	49
3.2.2	Determinación del método de optimización.....	55
3.2.3	Determinación del criterio de parada	56
3.3	Método de optimización – Método de Nelder-Mead modificado.....	57
3.3.1	Descripción.....	57
3.3.2	Implementación	62
3.4	Método de optimización – Método heurístico.....	64
3.4.1	Descripción.....	64
3.4.2	Implementación	67
4.	Validación y resultados de la metodología de optimización	69
4.1	Validación de la generación de descargas	69
4.1.1	Caso 1: Distribución de probabilidad de la descarga.....	70
4.1.2	Caso 2: Densidad de descargas	71
4.2	Validación del cálculo de impactos	72
4.2.1	Caso 1: Ejemplo 1 de la página 264 de la referencia [4]	73
4.2.2	Caso 2: Ejemplo 2 de la página 265 de la referencia [4]	74
4.3	Validación del cálculo del número de fallas	75
4.3.1	Caso 1:	75
4.4	Validación del método de optimización – Método de Nelder-Mead modificado.....	77
4.4.1	Caso 1:	77
4.5	Validación del método de optimización – Método heurístico.....	82
4.5.1	Caso 1:	82
4.5.2	Caso 2:	85
4.6	Aplicación de la metodología de optimización propuesta.....	88
4.6.1	Caso 1:	89
4.6.2	Caso 2:	98
4.6.3	Caso 3:	105
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	113
5.1	Conclusiones.....	113
5.2	Trabajos futuros	117
A.	Anexo: Herramienta de cálculo OTL.....	119
	Bibliografía	123

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Distancia de arco seco de un aislador típico (Tomado de [11]).....	7
Figura 1-2: Estructuras típicas de líneas de transmisión (Tomadas de [19]).	16
Figura 1-3: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	21
Figura 2-1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta para determinar el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas.	25
Figura 2-2: Área de trabajo.	27
Figura 2-3: Modelo geométrico, definición de ángulos y distancias (Tomado de [4]).	33
Figura 2-4: Vista expandida de la Figura 2-3 (Tomado de [4]).	34
Figura 2-5: Distancias de la descarga a la línea de transmisión.....	36
Figura 2-6: Esquema del cálculo de sobretensiones para un tramo de línea.	37
Figura 2-7: Tipos de estructuras a considerar para el cálculo de impedancia característica (Tomado de [23])......	39
Figura 2-8: Ejemplo de evaluación de los archivos de salida.	43
Figura 3-1: Funciones de penalización y barrera (Tomado de [50]).	51
Figura 3-2: Descripción gráfica de la función de costo.....	54
Figura 3-3: Ejemplo de aplicación del método de Nelder-Mead (Tomado de [53]). ..	58
Figura 3-4: Diagrama de flujo del método de Nelder-Mead.....	59
Figura 3-5: Descripción geométrica de las operaciones del método (Tomado de [54]).	62
Figura 3-6: Diagrama de flujo del método heurístico.....	66
Figura 4-1: Distribución de probabilidad compuesta para la amplitud de la corriente calculada y simulada.	70
Figura 4-2: Configuración de la estructura de la validación del cálculo de impactos – Caso 1.	73
Figura 4-3: Configuración de la estructura de la validación del cálculo de impactos – Caso 2.	74
Figura 4-4: Configuración de la estructura de la validación del cálculo de fallas – Caso 1.	75
Figura 4-5: Configuración en la herramienta OTL – Caso 1.....	77
Figura 4-6: Costo para cada caso.....	79
Figura 4-7: Error relativo del número de fallas totales calculadas respecto a las permitidas.	80
Figura 4-8: Error del número de fallas respecto al costo.....	80
Figura 4-9: Configuración de la herramienta OTL - Caso 1.....	83

Figura 4-10:	Configuración de la herramienta OTL - Caso 2.	86
Figura 4-11:	Densidad de descargas a tierra promedio (Tomado de [1]).	89
Figura 4-12:	Descargas a tierra en la herramienta OTL – Caso 1.....	90
Figura 4-13:	Configuración de la herramienta OTL – Caso 1.....	91
Figura 4-14:	Longitud de arco seco de cada estructura – Caso 1.....	93
Figura 4-15:	Resistencia de puesta a tierra de cada estructura – Caso 1.....	94
Figura 4-16:	Fallas de cada estructura – Caso 1.	95
Figura 4-17:	Configuración de la herramienta OTL – Caso 2.....	99
Figura 4-18:	Longitud de arco seco de cada estructura – Caso 2.....	101
Figura 4-19:	Resistencia de puesta a tierra de cada estructura – Caso 2.....	102
Figura 4-20:	Fallas de cada estructura – Caso 2.	103
Figura 4-21:	Configuración de la herramienta OTL – Caso 3.....	105
Figura 4-22:	Longitud de arco seco de cada estructura – Caso 3.....	107
Figura 4-23:	Resistencia de puesta a tierra de cada estructura – Caso 3.....	108
Figura 4-24:	Fallas de cada estructura – Caso 3.	109
Figura 5-1:	Ventana “Datos de entrada” de la herramienta OTL.....	120
Figura 5-2:	Ventana “Resultados” de la herramienta OTL.	121
Figura 5-3:	Ventana “Gráficas de la línea” de la herramienta OTL.....	121
Figura 5-4:	Ejemplo de ventanas emergentes de la herramienta OTL.	122

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra (Tomada de [17]).	8
Tabla 3-1: Resumen de las principales características del problema de optimización inicial y simplificado.	55
Tabla 4-1: Resultados de la validación de densidad de descargas.	72
Tabla 4-2: Resultados de la validación del cálculo de impactos – Caso 1.	73
Tabla 4-3: Resultados de la validación del cálculo de impactos – Caso 2.	74
Tabla 4-4: Resultados de la validación del cálculo de fallas – Caso 1.	76
Tabla 4-5: Resultados de la mejor condición y la peor condición en todas las estructuras.	78
Tabla 4-6: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda completa – Caso 1.	79
Tabla 4-7: Número de operaciones y simulaciones del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.	81
Tabla 4-8: Reducción del costo computacional del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.	81
Tabla 4-9: Reducción en el costo económico del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.	82
Tabla 4-10: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 1.	84
Tabla 4-11: Valor óptimo encontrado por ambas metodologías – Caso 1.	84
Tabla 4-12: Reducción del costo computacional del método de optimización heurístico – Caso 1.	85
Tabla 4-13: Reducción en el costo económico del método de optimización heurístico – Caso 1.	85
Tabla 4-14: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 2.	87
Tabla 4-15: Valor óptimo encontrado por ambas metodologías – Caso 2.	87
Tabla 4-16: Reducción del costo computacional del método de optimización heurístico – Caso 2.	87
Tabla 4-17: Reducción en el costo económico del método de optimización heurístico – Caso 2.	88

Tabla 4-18:	Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa de Nelder-Mead modificado y heurístico – Caso 1.....	92
Tabla 4-19:	Valor óptimo encontrado por ambos métodos de optimización – Caso 1....	96
Tabla 4-20:	Número de operaciones y simulaciones del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.....	96
Tabla 4-21:	Reducción del costo computacional de ambos métodos de optimización – Caso 1.	97
Tabla 4-22:	Reducción en el costo económico de ambos métodos de optimización – Caso 1.	97
Tabla 4-23:	Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 2.....	100
Tabla 4-24:	Valor óptimo encontrado por la metodología de optimización – Caso 2.....	103
Tabla 4-25:	Reducción del costo computacional de la metodología de optimización – Caso 2.	104
Tabla 4-26:	Reducción en el costo económico de la metodología de optimización – Caso 2.	104
Tabla 4-27:	Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 3.....	106
Tabla 4-28:	Valor óptimo encontrado por la metodología de optimización – Caso 3.....	109
Tabla 4-29:	Reducción del costo computacional de la metodología de optimización – Caso 3.	110
Tabla 4-30:	Reducción en el costo económico de la metodología de optimización – Caso 3.	110

Introducción

La creciente necesidad de un nivel mayor de confiabilidad del suministro de energía eléctrica ha generado en el diseño de líneas de transmisión la premisa de minimizar el número de fallas, las cuales en este contexto están dadas por el flameo del aislador, con el menor costo de construcción. Los dueños de este tipo de infraestructura buscan que la línea no esté fuera de servicio y no genere con ello demanda desatendida, lo cual puede ocasionar pérdidas cuantiosas. Por su parte, los constructores pretenden reducir los costos de la instalación al máximo, mientras que los diseñadores tratan de optimizar el diseño en general.

El origen de las fallas en las líneas de transmisión se puede caracterizar en tres grupos fundamentalmente: factores climáticos representados principalmente por descargas eléctricas atmosféricas y vientos fuertes, actos malintencionados que corresponden a actos vandálicos que hacen referencia a la voladura de una o varias estructuras sobre un circuito y otros orígenes, clasificados así porque no son frecuentes para la ocurrencia de fallas. Dentro de estos últimos se encuentran el cruce de conductores, fuego debajo de la línea y falla o defecto de equipo [1].

Las descargas eléctricas atmosféricas corresponden a la principal causa de fallas de las líneas de transmisión de energía eléctrica, abarcando valores cercanos al 34% de las fallas identificadas para estos sistemas [1]–[3]. Dichos valores aumentan en gran medida teniendo en cuenta que las causas de falla no identificadas se encuentran en el rango del 45% [1].

Por otro lado, las medidas preventivas que han sido aplicadas en el diseño de este tipo de sistemas no han sido suficientes, pues en la mayoría de los casos no se ha logrado una disminución considerable en las fallas de las líneas [1]. Además, las medidas correctivas que apuntan a disminuir las fallas por descargas eléctricas atmosféricas

suelen ser costosas, ya sea por los equipos requeridos o por la necesidad de poner fuera de servicio la línea para su implementación.

Con el fin de minimizar de forma económica las fallas por descargas eléctricas atmosféricas en las líneas de transmisión desde la etapa de diseño, es posible modificar principalmente dos parámetros: el nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra de las estructuras. Un incremento en el nivel de aislamiento traducido en la instalación de una mayor cantidad de aisladores y un valor de resistencia de puesta a tierra menor a partir del uso de una mayor cantidad de electrodos enterrados, ayuda a disminuir las fallas por impactos de descargas en el cable de guarda. Cabe anotar que existen otros parámetros que pueden ser modificados con el fin de minimizar las fallas por descargas eléctricas atmosféricas en líneas de transmisión como por ejemplo la disposición y dimensionamiento de los elementos que conforman el sistema de apantallamiento de la línea o el uso y ubicación de descargadores de sobretensión [4].

Tanto el incremento en la cantidad de aisladores como una mayor cantidad de electrodos enterrados implican una inversión mayor en la construcción de cada estructura de la línea de transmisión. Además, un valor único de estos elementos no puede generalizarse para los diferentes lugares de aplicación a lo largo de la línea debido a las características particulares que se pueden encontrar en su recorrido, como la resistividad del terreno y la densidad de descargas a tierra. Cabe anotar que estos últimos parámetros varían también a lo largo del año.

Por las razones anteriormente citadas, este trabajo de maestría apunta a establecer una metodología de optimización del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra para cada una de las estructuras en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas, teniendo en cuenta las variaciones de la actividad eléctrica atmosférica y los parámetros eléctricos del suelo a lo largo de la misma.

En este documento se desarrolla principalmente el siguiente contenido:

- En el primer capítulo se determinan los criterios de optimización técnicos y económicos del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en

líneas de transmisión, se describen los métodos existentes como punto de partida para este trabajo y se plantea la metodología de optimización a desarrollar.

- En el segundo capítulo se plantea el procedimiento para determinar el desempeño de las líneas de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas considerando las variaciones topológicas y ambientales a lo largo de su recorrido.
- Una vez planteada la metodología de optimización y el procedimiento a estudiar, en el tercer capítulo se aborda el método de optimización a implementar con el fin de especificar el nivel de aislamiento y la resistencia de puesta a tierra que cumplan con los criterios de optimización establecidos.
- Finalmente, en el cuarto capítulo se estudian una serie de casos con el fin de validar cada uno de los elementos utilizados en la metodología propuesta y la metodología por completo.

1.Generalidades

En este capítulo se presentan las principales características a considerar del nivel de aislamiento eléctrico, la resistencia de puesta a tierra y tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas. También se describen las bases teóricas que ayudarán a establecer los principales métodos y criterios referentes al cálculo y optimización del desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas. Finalmente, con base en los elementos descritos en este capítulo, se plantea la metodología de optimización a desarrollar en este trabajo.

1.1 Marco teórico y antecedentes

En la revisión bibliográfica realizada para este trabajo se encuentran diversos métodos que buscan calcular y optimizar el desempeño de las líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas, proponiendo soluciones parciales al problema que se va a desarrollar. Algunos de estos métodos serán estudiados en detalle y corresponderán al punto de partida de este trabajo.

1.1.1 Nivel de aislamiento eléctrico

El aislamiento eléctrico de una línea de transmisión está conformado por las distancias eléctricas en aire conductor - conductor y conductor - estructura. Esta última distancia está principalmente proporcionada por cadenas de aisladores cerámicos, de vidrio o poliméricos según sea el caso.

1.1.1.1 Requerimientos generales

El nivel de aislamiento eléctrico de las estructuras de la línea de transmisión se debe definir mediante una combinación de las distancias mínimas halladas en un procedimiento de coordinación de aislamiento basado en las sobretensiones debidas a

descargas atmosféricas, a las sobretensiones de maniobra y a las sobretensiones de frecuencia industrial [5].

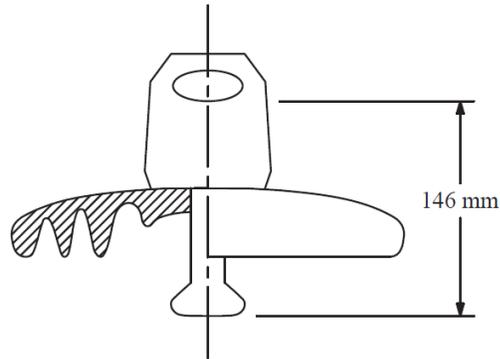
En el procedimiento de coordinación de aislamiento de una línea de transmisión se debe considerar como parámetro de diseño un máximo de 3 fallas/(100 km-año) con el fin de determinar el comportamiento ante descargas eléctricas atmosféricas [5]. El comportamiento de la línea ante sobretensiones de maniobra se debe realizar evaluando el riesgo de falla del aislamiento, permitiéndose una falla por cada cien operaciones de maniobra de la línea y el comportamiento de la línea ante sobretensiones de frecuencia industrial deberá asegurar su permanencia en servicio continuo [5].

1.1.1.2 Consideraciones para el cálculo

En el cálculo el nivel de aislamiento ante descargas eléctricas atmosféricas, es necesario determinar la soportabilidad eléctrica del aislamiento frente a una onda tipo rayo bajo condiciones atmosféricas, el cual se conoce como nivel básico de aislamiento al impulso (BIL por sus siglas en inglés). El BIL se calcula partiendo del valor de tensión crítica de flameo (CFO por sus siglas en inglés) de una cadena de aisladores, definida como la tensión pico y de frente rápido que tiene una probabilidad de flameo del 50%. Además, se debe tener en cuenta la desviación estándar de la rigidez del aire para este tipo de sobretensiones de acuerdo a la recomendación dada en la norma IEEE Std 1313.2 [6].

Por su parte, la CFO depende de la longitud de arco seco de la cadena de aisladores [7], [8] que corresponde a la distancia más corta a través del medio circundante entre los electrodos terminales, o a la suma de las distancias entre los electrodos intermedios; finalmente se escoge la menor entre las dos [9], [10]. En la Figura 1-1 se muestra un gráfico de un aislador, la distancia indicada en dicho gráfico corresponde a la longitud de arco seco de un aislador típico con un valor de 146 mm.

Figura 1-1: Distancia de arco seco de un aislador típico (Tomado de [11]).



Finalmente, el dimensionamiento eléctrico de las estructura de la línea de transmisión está relacionado con la longitud de arco seco de la cadena de aisladores, con el objetivo de que no se superen las distancias de aislamiento requeridas para cada tipo de sobretensión analizada.

El número de aisladores seleccionado en la coordinación de aislamiento tiene en cuenta la correlación de la longitud de arco seco dada por el efecto de la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra la línea de transmisión. Dicha consideración debe ser tenida en cuenta ya que los cálculos realizados en programas de simulación como el ATP/EMTP [12] no consideran dicha corrección, por lo que se incurriría en errores si se introduce una longitud ya corregida.

1.1.2 Resistencia de puesta a tierra

La puesta a tierra de una línea de transmisión está conformada principalmente por conductores, varillas y contrapesos enterrados en el suelo típicamente a profundidades de 0,5 m a 1,5 m. Estos elementos se conectan directamente al cable de guarda y a las estructuras de la línea de transmisión.

1.1.2.1 Requerimientos generales

En un diseño de puesta a tierra pueden tomarse como referencia los valores máximos de la Tabla 1-1, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-44 [13], ANSI/IEEE 80 [14], NTC 2050 [15] y NTC 4552 [16].

Tabla 1-1: Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra (Tomada de [17]).

Aplicación	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra [Ω]
Estructuras de líneas de transmisión o torrecillas metálicas de distribución con cable de guarda	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1
Subestaciones de media tensión	10
Protección contra rayos	10
Neutro de acometida en baja tensión	25

De acuerdo con la información de la Tabla 1-1, el valor de la resistencia de puesta a tierra para las estructuras de una línea de transmisión debe ser igual o menor a 20 Ω . Cabe anotar que debido a las particularidades del terreno en ocasiones no es posible obtener de forma práctica los valores de resistencia de puesta a tierra exigidos.

1.1.2.2 Consideraciones para el cálculo

En general, la resistencia de tierra de cualquier electrodo depende de la resistividad del suelo, el tamaño y el tipo de disposición de todos los conductores individuales que comprenden el electrodo de tierra [17]. La resistencia de puesta a tierra de un electrodo, para densidades de corrientes de magnitudes bajas que no provoquen ionización del suelo y de baja frecuencia, está constituida esencialmente por la resistencia del suelo circundante al electrodo de puesta a tierra. Dicha resistencia de puesta a tierra puede ser calculada y medida [18].

Debido a que ciertas configuraciones sencillas aparecen con frecuencia en la configuración de los sistemas de puesta a tierra, diversos autores han desarrollado expresiones analíticas que facilitan su evaluación [19]. Sin embargo, a medida que las geometrías requeridas por los sistemas de puesta a tierra deben complicarse para cumplir su objetivo, la dificultad de desarrollar expresiones para el cálculo de su resistencia aumenta, hasta el punto de solo disponerse de expresiones aproximadas para una estimación de dichas resistencias. Por último, cuando tanto las geometrías como el suelo no pueden mantenerse simplificados, es necesaria una aproximación con métodos

numéricos y recursos computacionales. Una forma de hacer esto es mediante la segmentación del electrodo y la aplicación de la teoría de las imágenes [18].

1.1.3 Tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas

Entre las fallas de líneas de transmisión generadas por descargas eléctricas atmosféricas se distinguen dos tipos: las fallas debidas a apantallamiento y las debidas a flameo inverso. Las fallas debidas a apantallamiento son causadas por las sobretensiones generadas por el impacto de una descarga directamente sobre el conductor de fase. Por su parte, las fallas debidas a flameo inverso son causadas por las sobretensiones generadas por el impacto de una descarga sobre el cable de guarda [2]. Sumando las fallas debidas a apantallamiento con las debidas a flameo inverso, se obtiene un número total de fallas debidas a descargas eléctricas atmosféricas. Finalmente, con el último número total de fallas se establece la tasa de fallas debidas a descargas eléctricas atmosféricas en las unidades de fallas/(100 km-año).

La norma IEEE 1313.2 [6] en el numeral 5.1 señala que la tasa de fallas por descargas atmosféricas varía según la tensión del sistema y puede estar en el rango de 0,5 fallas/(100 km-año) para sistemas de extra alta tensión a 20 fallas/(100 km-año) para sistemas de alta tensión. Dicha tasa solo tiene en cuenta los flameos de la cadena de aisladores independientemente si estos tienen como consecuencia la salida de línea, e indistintamente si la operación de recierre es exitosa o no [20].

Desde el punto de vista del diseño se tienen principalmente dos enfoques respecto a la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas. En el primero, presentado en algunos de los artículos de la referencia [21], se considera esta tasa como uno de los elementos a optimizar relacionándolo con un índice de desempeño que está basado en el costo medio anual de la energía no suministrada, los principales costos de reparación de una falla permanente y el costo anual de una falla para el consumidor para una línea determinada. Este enfoque aplica principalmente a líneas existentes que requieren mejorar su desempeño.

En el segundo, se toma como elemento de entrada lo determinado por el diseñador o por la normativa de cada país, como por ejemplo para el caso colombiano donde la

resolución CREG 098 de 2000 estipula que con el fin de evaluar el comportamiento ante descargas eléctricas atmosféricas, se debe considerar como parámetro de diseño un máximo de 3 fallas/(100 km-año) [5]. Este enfoque aplica principalmente a líneas nuevas en el proceso de diseño donde se está determinando su desempeño.

1.1.4 Desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas

Con el fin de determinar el desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas se han desarrollado varios métodos simplificados, que basados en ecuaciones analíticas del fenómeno, dan como resultado aproximaciones del comportamiento de la descarga y su influencia en las líneas de transmisión. Uno de los modelos matemáticos que sentó bases en este campo fue la estrategia analítica de A. R. Hileman [4], presentando ecuaciones analíticas que permiten discriminar las descargas eléctricas atmosféricas correspondientes a impactos directos y a fallas en una línea de transmisión.

Otra de las metodologías utilizadas para la estimación de las tasas de fallas por descargas en líneas aéreas por medio de métodos simplificados, corresponde a la implementada en el programa FLASH [22], el cual realiza el cálculo de la tasa de fallas para una configuración y características de estructura generalizadas para la línea usando un procedimiento determinístico. Dicho programa fue escrito para implementar y probar los métodos propuestos por la IEEE [8], [23].

También se han utilizado métodos alternativos para el cálculo de la tasa de fallas en líneas de transmisión como la simulación aleatoria de descargas por medio del método Monte Carlo, de la mano con la clasificación de los impactos mediante el método electrogeométrico y simulaciones con modelos detallados en ATP/EMTP [12] para la determinación de la falla del aislamiento [24], [25]. Los métodos en cuestión se fundamentan en que debido a la naturaleza de las descargas eléctricas atmosféricas y de sus parámetros, los cálculos de sus efectos se deben basar en un enfoque estadístico y en que debido a la complejidad de las condiciones en las cuales este ocurre, dada por los parámetros de la línea de transmisión involucrados, los cálculos de las sobretensiones

generadas requieren un mayor detalle en el modelado de los elementos involucrados. Una simulación de Monte Carlo es un método comúnmente utilizado para el primer propósito.

Un procedimiento de Monte Carlo para el cálculo de las tasas de fallas por descargas eléctricas atmosféricas consta básicamente de las siguientes etapas: generación de eventos aleatorios con el fin de obtener los parámetros de la descarga y de la línea aérea a partir de sus distribuciones estadísticas, aplicación de un modelo de discriminación del punto de impacto de cada descarga, cálculo de la sobretensión generada por cada impacto y el cálculo de la tasa de fallas por descargas [24], [25].

Por su parte, la discriminación de las descargas generadas aleatoriamente se realiza con base en el método electrogeométrico a través del cual se determina un área alrededor de la línea a partir de la corriente de la descarga y la geometría de cada estructura. Los impactos que se encuentren dentro de esta área son considerados como impactos directos ya sea en el cable de guarda o en alguno de los conductores de fase [4].

Uno de los programas utilizados en con el fin calcular la tasa de fallas en líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas que utiliza el método estadístico de Monte Carlo es el T-FLASH [7], [19]. Esta herramienta desarrollada por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI por sus siglas en inglés), genera para las descargas atmosféricas varias muestras aleatorias y después de ello analiza el comportamiento del sistema ante dichos valores generados por medio de expresiones analíticas [1]. Como resultado, la herramienta especifica los posibles problemas a presentarse en cada una de las estructuras de forma independiente sin arrojar un resultado global del desempeño de la línea.

Por su parte el programa ATP/EMTP [12] se utiliza para el cálculo de sobretensiones debidas a descargas eléctricas atmosféricas en líneas de transmisión [24]–[29]. Lo anterior se realiza implementando modelos detallados de los principales componentes de la línea como los conductores de fase, el cable de guarda, las estructuras, las cadenas de aisladores, la puesta a tierra y los descargadores de sobretensión.

1.1.5 Optimización de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas

Debido a los altos costos asociados con la construcción de las líneas de transmisión se han realizado diferentes esfuerzos en la optimización de su diseño de los principales elementos que la conforman. Con relación a las estructuras de la línea de transmisión, se encuentra un estudio donde se presenta una formulación general para el diseño óptimo estructural, el cual está enfocado en obtener el mínimo costo considerando las limitaciones impuestas por la normativa para este tipo de estructuras, en este estudio se utilizó un método de optimización de recocido simulado [30]. Asimismo, se encuentra un estudio de optimización de los parámetros de potencia, tensión, estrés superficial y temperatura de la línea de transmisión donde se representa matemáticamente el desempeño de la línea, y mediante el método de optimización de programación no lineal se obtienen los valores óptimos de dichos parámetros [31].

Respecto a las líneas de transmisión y las descargas eléctricas atmosféricas se encuentra un estudio de optimización de la ruta de la línea basado en la incidencia de descargas eléctricas reportada por un sistema de localización. En este estudio se busca reducir el número de impactos directos en la línea, por lo que se calcula el número de impactos mediante expresiones analíticas aproximadas y se utiliza un método de optimización basado en el algoritmo de Dijkstra para replantear su recorrido [32]. También, se encuentra un estudio de optimización de diseño donde el sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión se presenta como un problema de programación entera lineal en términos de sus características constructivas, esto con el fin de minimizar los costos de inversión sujetos a la tasa máxima de fallas que es calculada mediante expresiones analíticas aproximadas [33].

En algunos estudios de diseño de líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas, se han implementado técnicas de optimización que apuntan a establecer el desempeño de la línea mediante una expresión analítica llamada índice de desempeño. Este índice está compuesto por los costos de los parámetros de diseño de la línea y un costo asignado a la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas. En estos casos se consideran parámetros de diseño iguales por

tramos de línea de transmisión y se calcula la tasa de fallas de la misma mediante ecuaciones matemáticas aproximadas [21], [34].

Uno de los estudios mencionados busca minimizar una función objetivo de varias variables, que incluye el nivel de aislamiento eléctrico, la resistencia de puesta a tierra y la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas con sus respectivos costos de inversión. En este caso se utilizó el método de Newton-Raphson, una de las técnicas clasificadas dentro de métodos iterativos [21]. En otro trabajo de los mismos autores se sumó a la función objetivo del trabajo anterior el costo de la implementación de descargadores de sobretensión en la línea de transmisión a fin de optimizar el desempeño de la línea considerando este nuevo elemento de protección [34].

1.2 Justificación

Como se mencionó en el numeral anterior, actualmente existen métodos que buscan calcular y optimizar las líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas. En dichos métodos se utilizan algunas aproximaciones a partir de las cuales se obtienen diferencias respecto a los valores encontrados en la práctica, a continuación se mencionan algunos ejemplos.

En algunos métodos se realiza el cálculo de la tasa de fallas basado en modelos simplificados y aproximaciones en los cálculos de las sobretensiones por descargas atmosféricas IEEE [8], [22], [23], IEC [35] y CIGRE [36], con lo que se desprecia la naturaleza estadística de las descargas eléctricas atmosféricas. También, Se realiza el cálculo de la tasa de fallas para una configuración de estructura, longitud de cadena de aisladores y resistencia de puesta a tierra generalizada para la línea [24], [25], con lo que se desprecia la variación de los parámetros en su recorrido y la topología de la misma.

En otros métodos, se usan aproximaciones para el cálculo del número de descargas a tierra que impactan en las líneas de transmisión [21], [23], despreciando la geometría real de cada estructura. Asimismo, se desprecian tramos de la línea y particularidades de cada estructura para generar la tasa de fallas de la misma, generalizando o segmentando por regiones [21]–[23], causando de esta forma sobre o sub dimensionamientos en los niveles de aislamiento y la resistencia de puesta a tierra de algunas estructuras.

Con el fin de optimizar el nivel de aislamiento y la resistencia de puesta a tierra de las líneas de transmisión, se pueden mejorar las aproximaciones que actualmente se realizan en los cálculos de la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas. Lo anterior considerando la topología de la línea en su totalidad, la geometría particular de cada estructura y las características propias del lugar de instalación. Además, es posible considerar las distribuciones de probabilidad de los parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas, sus posibles puntos de impacto y simular detalladamente el comportamiento electromagnético de los diferentes elementos de las líneas de transmisión.

1.3 Criterios técnicos y económicos a tener en cuenta en este trabajo

De acuerdo con el objetivo, el marco teórico, los antecedentes y la justificación de este trabajo, se plantean a continuación las principales consideraciones en las que se basará la metodología a desarrollar.

1.3.1 Elementos generales de la línea de transmisión

1.3.1.1 Niveles de tensión

Con el fin de tener en cuenta las principales tensiones de las líneas de transmisión en Colombia se tienen en cuenta principalmente los niveles de tensión entre 110 kV y 500 kV.

1.3.1.2 Estructuras

Como se desea verificar el efecto de la resistencia de puesta a tierra de las estructuras es necesario considerar mínimamente un cable de guarda. De no ser así, la mayoría de los impactos se presentarían directamente en las fases y la resistencia de puesta a tierra no tendría ningún efecto en el fenómeno. Con el fin de abarcar las principales estructuras de las líneas de transmisión se tienen en cuenta líneas con uno y dos circuitos.

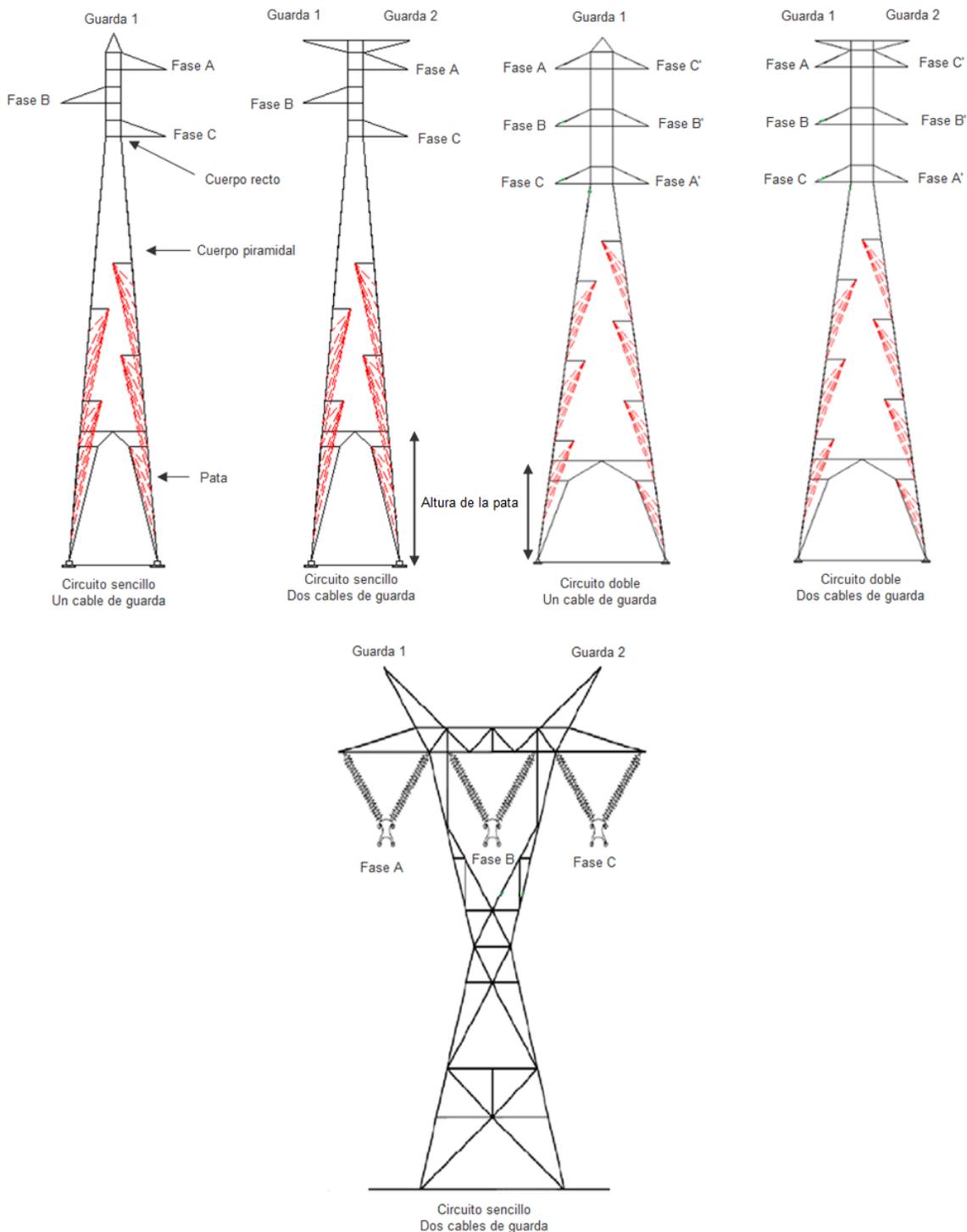
De acuerdo a lo anterior, se trabajará con estructuras de cuatro, cinco, siete y ocho conductores teniendo en cuenta las principales características de estos últimos como sus dimensiones y la resistencia DC, permitiendo además el uso de haz de conductores. Cualquier modificación geométrica que cumpla con estas condiciones puede ser abordada por la metodología de optimización a desarrollar.

En la Figura 1-2 se presentan a modo de ejemplo algunas de las configuraciones que serán tenidas en cuenta por el presente trabajo. En dicha figura se muestran cinco tipos de estructuras utilizadas en líneas de transmisión en las que se varía el número de circuitos y de cables de guarda. También, se indica en la Figura 1-2 los elementos correspondientes al cuerpo piramidal, el cuerpo recto, la pata y su altura en algunas de las estructuras mostradas.

Se considerará la topología de la línea en detalle teniendo en cuenta el efecto de las particularidades de cada estructura y de las estructuras vecinas. Lo anterior se logrará considerando para cada una de las estructuras los siguientes elementos como información de entrada:

- La ubicación espacial.
- La altura de la pata.
- La resistividad del terreno.
- Nivel de aislamiento eléctrico.
- La resistencia de puesta a tierra.

Figura 1-2: Estructuras típicas de líneas de transmisión (Tomadas de [19]).



1.3.1.3 Vanos

Para cada uno de los vanos se tendrá en cuenta la resistividad, la longitud y el nivel cerámico o densidad de descargas a tierra. De esta forma se considerará las variaciones de los mencionados parámetros en el recorrido de la línea.

1.3.2 Tasa de fallas por descarga eléctrica atmosférica

En la metodología a desarrollar en este trabajo se considerará la tasa de falla por descarga eléctrica atmosférica permitida y calculada. La tasa de fallas por descarga eléctrica atmosférica permitida se tomará como dato de entrada, de forma que se pueda ingresar este parámetro según las consideraciones particulares del diseñador. Por su parte, la tasa de fallas por descarga eléctrica atmosférica calculada corresponderá a la hallada mediante la evaluación del desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas propuesta en este trabajo.

1.3.3 Nivel de aislamiento eléctrico

De acuerdo con lo explicado en el marco teórico de este trabajo se establecen los siguientes criterios concernientes al nivel de aislamiento eléctrico:

- **Valor de trabajo:** Se tomará como valor de trabajo la longitud de arco seco del aislador en metros [m] sin corrección de altura sobre el nivel del mar.
- **Valor mínimo:** Longitud de arco seco mínima alcanzable para cada una de las estructuras. Se considera como un dato de entrada para la metodología estimado por el diseñador a fin de que se tengan en cuenta las consideraciones particulares del diseño.
- **Valor máximo:** Longitud de arco seco máxima alcanzable para cada una de las estructuras. Se considera como un dato de entrada para la metodología estimado por el diseñador a fin de que se tengan en cuenta las consideraciones particulares del diseño.
- **Pasos:** Se adoptó un paso de 0,146 m (longitud de arco seco de un aislador estándar de porcelana o vidrio) para la realización de los diferentes cálculos teniendo en cuenta los valores esperados para la longitud de arco seco de los aisladores de una línea de transmisión.

- **Costo:** Se asume como el costo de un paso más (0,146 m) para el aislamiento de la línea, es decir, un aislador adicional en cada una de las cadenas de la estructura. Para asignar este elemento se deben tener en cuenta los gastos del material y la mano de obra. Se considera como un dato de entrada para la metodología estimado por el diseñador a fin de que se tengan en cuenta las consideraciones particulares del diseño.

1.3.4 Resistencia de puesta a tierra

De acuerdo con lo explicado en marco teórico de este trabajo se establecen los siguientes criterios concernientes a la resistencia de puesta a tierra:

- **Valor de trabajo:** Se tomará como valor de trabajo directamente la resistencia de puesta a tierra en ohmios [Ω] a baja frecuencia.
- **Valor mínimo:** Resistencia de puesta a tierra mínima alcanzable para cada una de las estructuras. Se considera como un dato de entrada para la metodología estimado por el diseñador a fin de que se tengan en cuenta las consideraciones particulares del diseño.
- **Valor máximo:** Resistencia de puesta a tierra máxima alcanzable para cada una de las estructuras. Se considera como un dato de entrada para la metodología estimado por el diseñador a fin de que se tengan en cuenta las consideraciones particulares del diseño.
- **Pasos:** Se adoptó un paso de 2Ω para la realización de los diferentes cálculos teniendo en cuenta los valores esperados para la resistencia de puesta a tierra de las estructuras de una línea de transmisión.
- **Costo:** Se asume como el costo de un paso menos (2Ω) para la puesta a tierra de la estructura. Para asignar este elemento se deben tener en cuenta los gastos del material y la mano de obra. Se considera como un dato de entrada para la metodología estimado por el diseñador a fin de que se tengan en cuenta las consideraciones particulares del diseño.

1.4 Planteamiento de la metodología de optimización

Dado que el objetivo principal de este trabajo es la optimización del nivel del aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas, se establece una metodología que utiliza un conjunto de cálculos basados en los criterios técnicos definidos en el numeral anterior. Dicha metodología permite especificar el nivel de aislamiento óptimo y la resistencia de puesta a tierra óptima para cada estructura de la línea de transmisión en estudio, teniendo en cuenta las características particulares de cada lugar como la resistividad del terreno y la densidad de descargas a tierra.

La Figura 1-3 muestra el diagrama de flujo de la metodología de optimización propuesta. En este diagrama se evidencian dos procesos principales, el primero correspondiente a la determinación del desempeño de la línea de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas y el segundo correspondiente al método de optimización.

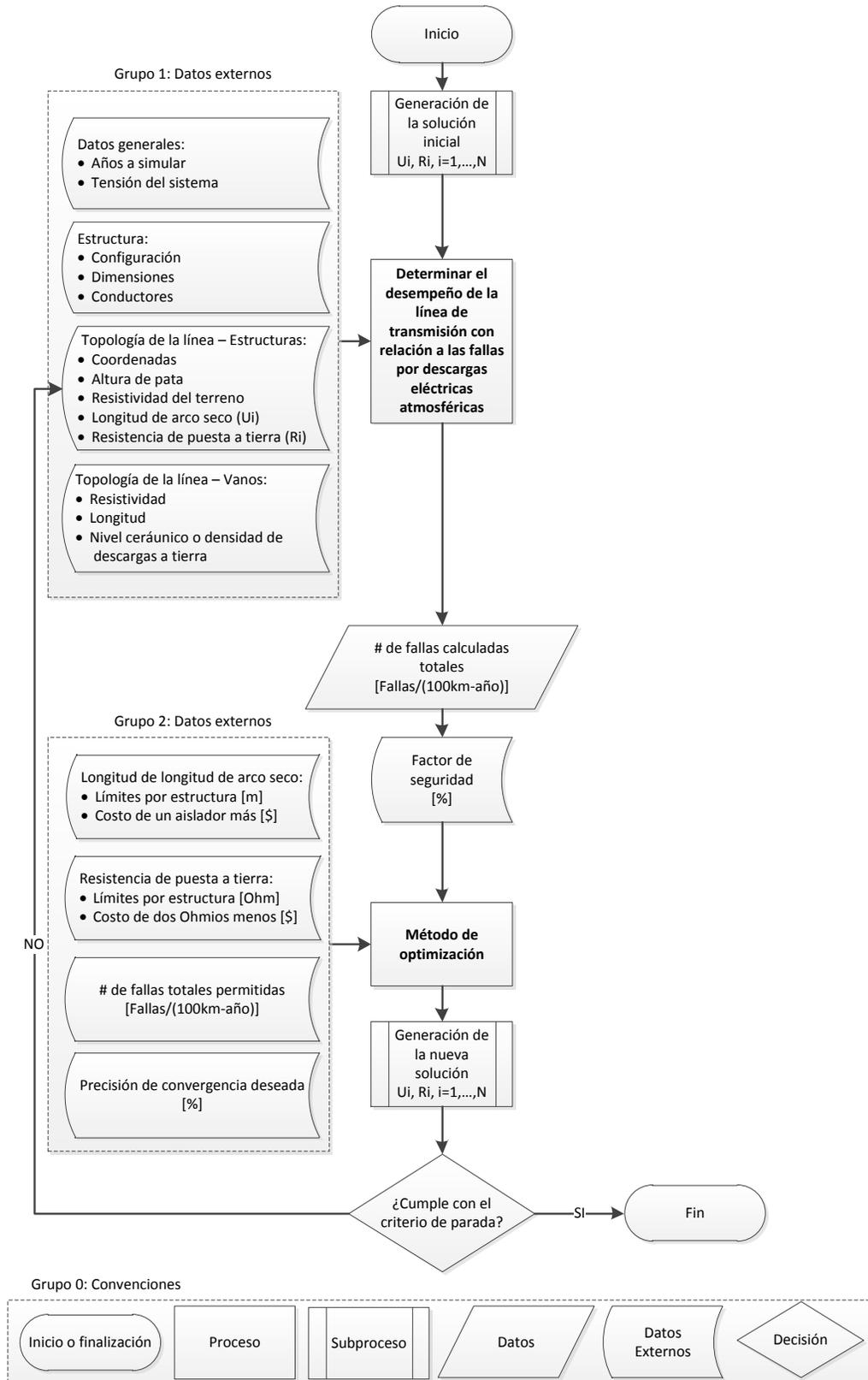
El primer proceso parte de una solución inicial que corresponde a los valores de diseño de longitud de arco seco de cada estructura U_i y de resistencia de puesta a tierra de cada estructura R_i , donde $i = 1, \dots, N$ corresponde al número de la estructura. Con base en esta solución inicial y los datos externos del Grupo 1 correspondientes a los datos generales del caso a estudiar, la información de la estructura y la información de la topología de la línea, se determina el desempeño de la línea de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas mediante una metodología de simulación basada en modelos matemáticos. Finalmente, el primer proceso principal arroja como resultado el número de fallas calculadas totales para la línea.

El segundo proceso principal parte del número de fallas calculadas totales para la línea multiplicado por un factor de seguridad para el diseño. Con base en este número de fallas y los datos externos del Grupo 2 correspondientes a los límites y costos de la longitud de arco seco y la resistencia de puesta a tierra, el número de fallas totales permitidas y la precisión de convergencia deseada, se genera la nueva solución de longitud de arco seco U_i y de resistencia de puesta a tierra R_i de cada estructura mediante el método de optimización. Por último, si la nueva solución generada cumple

con el criterio de parada se finaliza el proceso, en caso contrario dicha solución se introduce en los datos externos del Grupo 1 reemplazando la longitud de arco seco U_i y la resistencia de puesta a tierra R_i de cada estructura y se vuelven a ejecutar ambos procesos principales hasta que se cumpla con el criterio de parada de la metodología de optimización.

En los siguientes capítulos de este trabajo serán desarrollados en detalle los dos procesos principales ya mencionados que contempla la metodología de optimización: La determinación del desempeño de las líneas de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas en el capítulo 2 y el método de optimización en el capítulo 3.

Figura 1-3: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.



2. Desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas

En este capítulo se desarrollará el primer proceso principal de la metodología de optimización correspondiente a la determinación del desempeño de la línea de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas. Lo anterior, de acuerdo con el diagrama de flujo de la metodología de optimización propuesta mostrado en la Figura 1-3.

Con el fin de determinar el desempeño de las líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas considerando las variaciones topológicas y ambientales a lo largo de su recorrido, se utilizará una metodología de simulación basada en modelos matemáticos. La Figura 2-1 muestra el diagrama de flujo de la metodología de simulación propuesta. En este diagrama se evidencian cuatro procesos enmarcados en el Grupo 2.

El primer proceso correspondiente a la generación aleatoria de las descargas eléctricas atmosféricas parte de los datos externos de entrada discriminados en el Grupo 1 que contienen la información de los años a simular y la topología de la línea. Con base en estos datos externos, se realizan los subprocesos discriminados en el Grupo 3 dados por la definición del área de trabajo, la definición de la cantidad de descargas y el método Monte Carlo. El método Monte Carlo tiene como entrada las distribuciones de probabilidad de la amplitud I_p y el tiempo de frente t_f de la descarga y la distribución de probabilidad uniforme de la posición de la descarga respecto a la línea (x_d, y_d) . Este proceso arroja como resultado los parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas y su posición respecto a la línea.

El segundo proceso correspondiente a la discriminación de los impactos directos parte de los datos externos de entrada discriminados en el Grupo 1 que contienen la información de la estructura y la topología de la línea. Con base en estos datos externos y los datos obtenidos del proceso anterior, se realizan los subprocesos discriminados en el Grupo 3 dados por la discriminación del vano donde impacta la descarga, el cálculo de la menor distancia de la descarga a la línea y la aplicación del método electrogeométrico. Este proceso arroja como resultado los parámetros de los impactos directos en la línea incluyendo la torre o vano y el cable de guarda o conductor de fase impactados.

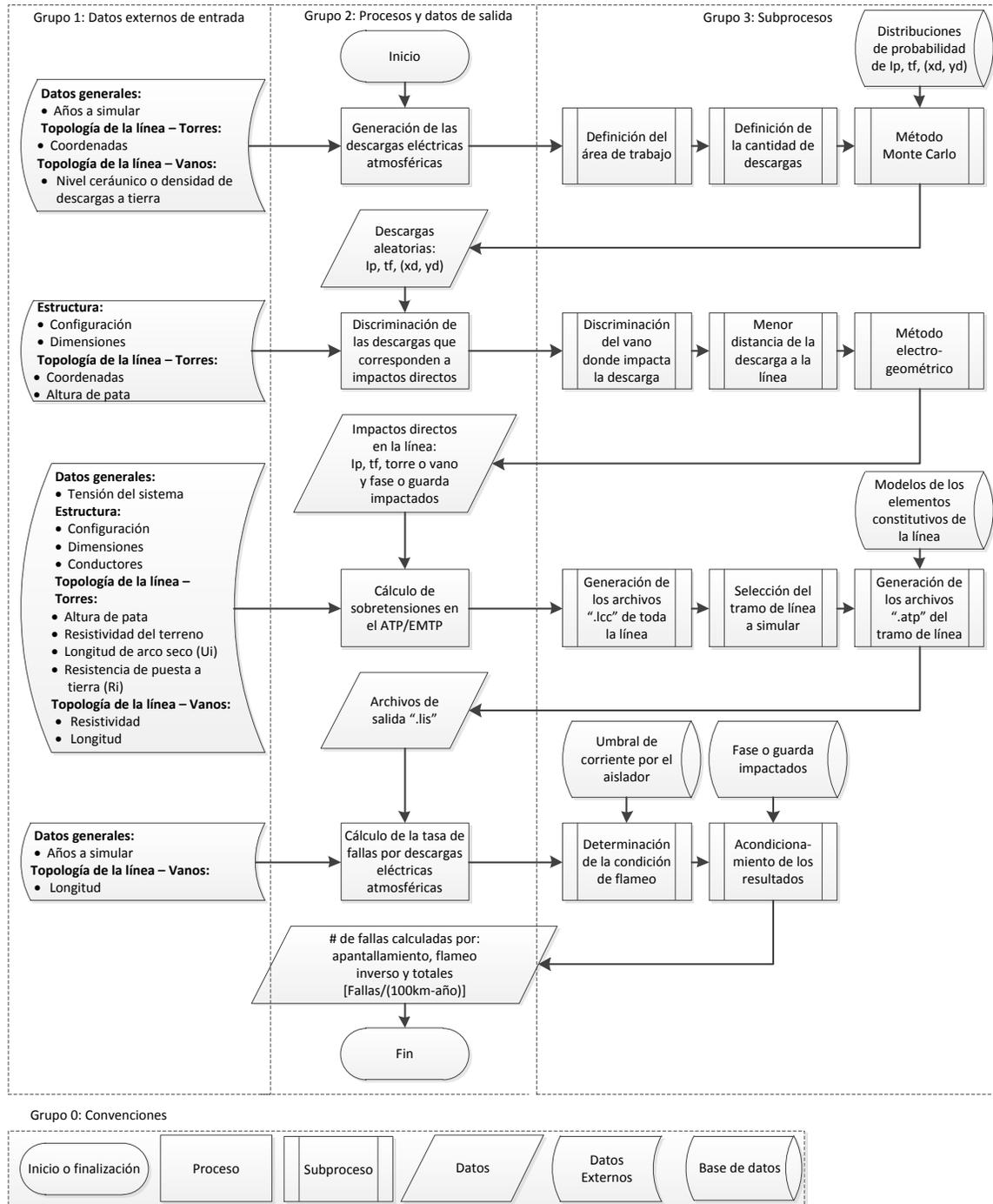
El tercer proceso correspondiente al cálculo de las sobretensiones en el ATP/EMTP [12] parte de los datos externos de entrada discriminados en el Grupo 1 que contienen la información de la tensión del sistema, la estructura y la topología de la línea. Con base en estos datos externos y los datos obtenidos del proceso anterior, se realizan los subprocesos discriminados en el Grupo 3 dados por la generación de los archivos “.icc” de toda la línea, la selección y la generación de los archivos “.atp” del tramo de línea a simular. La generación de los archivos “.atp” del tramo de línea a simular tiene como entrada los modelos de los elementos constitutivos de la línea. Este proceso arroja como resultado los datos de los archivos “.lis” del ATP/EMTP [12].

Por último, el cuarto proceso correspondiente al cálculo de la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas parte de los datos externos de entrada discriminados en el Grupo 1 que contienen la información de los años a simular y la longitud de la línea. Con base en estos datos externos y los datos obtenidos del proceso anterior, se realizan los subprocesos discriminados en el Grupo 3 dados por la determinación de la condición de flameo y el acondicionamiento de los resultados. La determinación de la condición de flameo y el acondicionamiento de los resultados tiene como entrada el umbral de corriente por el aislador y el cable de guarda o el conductor de fase impactado, respectivamente. Este proceso arroja como resultado el número de fallas calculadas por apantallamiento, flameo inverso y totales.

En los numerales 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 de este capítulo serán desarrollados en detalle los cuatro procesos principales ya mencionados que contempla la metodología de

simulación, con base en la cual se realiza la evaluación del desempeño de líneas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas.

Figura 2-1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta para determinar el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas.



2.1 Generación aleatoria de las descargas eléctricas atmosféricas

En este numeral se desarrollará el primer proceso de la metodología de simulación propuesta correspondiente a la generación aleatoria de las descargas eléctricas atmosféricas. Lo anterior, de acuerdo con el diagrama de flujo de la metodología propuesta para determinar el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas mostrado en la Figura 2-1.

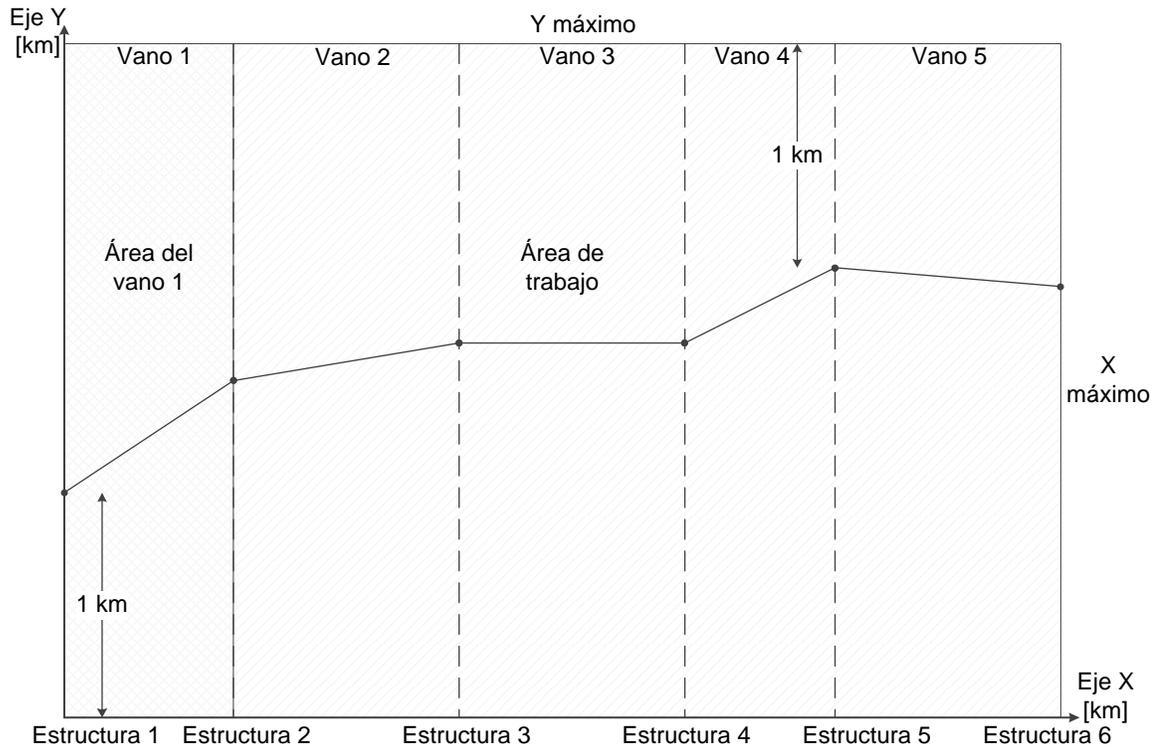
En el área donde se encuentra ubicada la línea de transmisión se realizará una simulación de impactos de descargas eléctricas atmosféricas utilizando una rutina Monte Carlo que involucra la densidad de descargas eléctricas atmosféricas de cada vano y las distribuciones de probabilidad de las corrientes de descarga aceptadas mundialmente. De esta forma se considerará la naturaleza estadística del fenómeno. A continuación se presentan las consideraciones del proceso de la metodología de simulación correspondiente a este capítulo.

2.1.1 Definición del área de trabajo

Como se muestra en la Figura 2-2, con el fin de definir el área de trabajo se verifican las coordenadas de cada una de las estructuras de la línea de transmisión, se le resta un kilómetro a la coordenada de menor valor y se le suma un kilómetro a la coordenada de mayor valor en el eje y . Por su parte, en el eje x , la coordenada de menor valor corresponde a la primera estructura y la coordenada de mayor valor a la última. De esta manera se encuentran las dimensiones máximas $x_{\text{máximo}}$ y $y_{\text{máximo}}$, y multiplicando dichas dimensiones se establece el área de trabajo.

En la Figura 2-2 se presenta una línea de transmisión conformada por seis estructuras y cinco vanos. En esta figura se pueden observar las dimensiones máximas, el área trabajo total y el área del vano 1 a modo de ejemplo.

Figura 2-2: Área de trabajo.



2.1.2 Definición de la cantidad de descargas

Debido a que el área de trabajo y los años a ser tenidos en cuenta varían para cada una de las líneas a estudiar y a que el nivel cerámico y la densidad de descargas a tierra varían para cada uno de los vanos, se debe definir la cantidad total de impactos de descargas a simular. Para ello se toma el valor del nivel cerámico T_d de cada uno de los vanos y se calcula la densidad de descargas a tierra N_g por medio de la Ecuación (2.1) [16]:

$$N_g = 0,0017 \cdot T_d^{1,56} \tag{2.1}$$

También es posible utilizar directamente el valor de la densidad de descargas a tierra de cada vano con el fin de considerar las demás aproximaciones que se encuentran en la literatura [37], [38] dependiendo del tipo de región o incluso las mediciones en campo para una ubicación específica.

Con base en la densidad de descargas a tierra de cada vano $N_{g\text{vano}i}$ y la distancia en el eje x de cada vano $x_{\text{vano}i}$ se obtiene una densidad de descargas a tierra promedio ponderada \overline{N}_g para toda el área de trabajo como se muestra en la Ecuación (2.2).

$$\overline{N}_g = \frac{\sum_{i=1}^N N_{g\text{vano}i} \cdot x_{\text{vano}i}}{\sum_{i=1}^N x_{\text{vano}i}} \quad (2.2)$$

Finalmente, se encuentra la cantidad de descargas totales a simular N_{DT} por medio de la multiplicación de la densidad de descargas a tierra promedio ponderada \overline{N}_g , el área de trabajo A_T y el número de años a simular $N_{\text{años}}$ como se muestra en la Ecuación (2.3).

$$N_{DT} = \overline{N}_g \cdot A_T \cdot N_{\text{años}} \quad (2.3)$$

Debido a que inicialmente se encuentra la cantidad de descargas totales a simular y a que se desea considerar la actividad atmosférica diferenciada para cada uno de los vanos, se variará la cantidad de descargas por vano por medio de un procedimiento estadístico que se describe en el numeral 2.1.4 y se valida en el numeral 4.1.2 de este trabajo.

2.1.3 Selección de las distribuciones de probabilidad de amplitud y tiempo de frente de la corriente, y de la posición de la descarga con respecto a la línea

Debido a la cantidad de parámetros involucrados en el cálculo de las descargas eléctricas atmosféricas, es necesario definir cuáles de estos parámetros serán variados aleatoriamente y cuáles permanecerán constantes. De acuerdo con estudios realizados previamente donde se involucró la naturaleza estadística del fenómeno se han variado los de forma aleatoria los siguientes parámetros [24], [25]:

- Magnitud de la Corriente.
- Tiempo de frente de la corriente.
- Posición de la descarga con respecto a la línea.
- Tensión de fase.
- Resistencia de puesta a tierra
- Nivel de aislamiento.

En la metodología de simulación planteada en este trabajo se considera la tensión de fase, la resistencia de puesta a tierra y el nivel de aislamiento eléctrico por medio de modelos detallados, por esta razón no se realizarán variaciones aleatorias a estos elementos. El resto de los parámetros serán variados aleatoriamente.

Con el objetivo de incluir la amplitud y del tiempo de frente de la corriente en los cálculos de las tensiones, se utilizarán los valores recomendados por el comité CIGRE N° 33 [39]. Para el valor pico de la corriente se observó que los datos se ajustaban a una distribución log-normal con los siguientes parámetros:

- Media del valor pico de la corriente, $I_p = 30,0 \text{ kA}$
- Logaritmo natural de la desviación estándar, $\delta_{\ln I_p} = 0,32$

Posteriormente, con base en el estudio de una serie de mediciones se encontró que esta distribución no era estadísticamente satisfactoria, por lo que se propuso el utilizar una representación arbitraria en dos tramos de esta distribución con los parámetros que se muestran a continuación:

- Para corriente menores o iguales a 20 kA:
 - Media del valor pico de la corriente, $I_p = 61,1 \text{ kA}$
 - Logaritmo natural de la desviación estándar, $\delta_{\ln I_p} = 1,33$
- Para corriente mayores a 20 kA:
 - Media del valor pico de la corriente, $I_p = 33,3 \text{ kA}$
 - Logaritmo natural de la desviación estándar, $\delta_{\ln I_p} = 0,65$

Con respecto al tiempo de frente, se asume el parámetro $T-30$ definido en la referencia [39] que representa el intervalo entre el 30% y el 90% de la amplitud total de la onda. La distribución de probabilidad del tiempo de frente $T-30$ está dada para todos los valores de corriente por los parámetros que se muestran a continuación:

- Media del tiempo de frente, $t_f = 3,83 \mu\text{s}$
- Logaritmo natural de la desviación estándar, $\sigma_{\ln t_f} = 0,553$

Con relación a la posición de la descarga con respecto a la línea, la distribución de probabilidad de será asumida como no uniforme en el área de trabajo a fin de darle

mayor probabilidad a los vanos con mayor densidad de descargas a tierra y mayor longitud. Por otra parte, se asumirá una distribución de probabilidad uniforme por vano, es decir que cualquier posición tiene la misma probabilidad de ocurrencia dentro del área del vano definida anteriormente.

2.1.4 Variación aleatoria de los parámetros – Método de Monte Carlo

De acuerdo con el método de Monte Carlo se generará una serie de números aleatorios, con base en los cuales se establecerán los parámetros de la magnitud, el tiempo de frente y la posición con respecto a la línea de la descarga de acuerdo con las distribuciones mostradas anteriormente. Finalmente, estos parámetros corresponderán a los datos de entrada para las simulaciones de las sobretensiones en ATP/EMTP [12]. Las consideraciones para la implementación del método Monte Carlo en este trabajo se presentan a continuación.

La probabilidad de que ocurra cierta corriente está dada por la Ecuación (2.4).

$$f(I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot I_p \cdot \sigma_{\ln I_p}} e^{-\frac{(\ln I_p - \mu_{\ln I_p})^2}{2\sigma_{\ln I_p}^2}} \quad (2.4)$$

donde:

$\mu_{\ln I_p}$ es el logaritmo natural del valor medio de la corriente.

$\sigma_{\ln I_p}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de la corriente.

La probabilidad de que ocurra cierto tiempo de frente dada cierta magnitud de corriente está dada por la Ecuación (2.5).

$$f(t_f/I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot I_p \cdot \sigma_{\ln t_f}^*} e^{-\frac{(\ln I_p - \mu_{\ln t_f}^*)^2}{2\sigma_{\ln t_f}^{*2}}} \quad (2.5)$$

donde:

$$\mu_{int_f}^* = \mu_{int_f} + \rho \frac{\sigma_{int_f}}{\sigma_{lnI_p}} (\ln I_p - \mu_{lnI_p}) \quad (2.6)$$

$$\sigma_{int_f}^* = \sigma_{int_f} \sqrt{1 - \rho^2} \quad (2.7)$$

ρ coeficiente de correlación con un valor de 0,46 de acuerdo con [39]

Con el fin de hallar los eventos aleatorios, se utiliza el método de transformación inversa [40] aplicado a la distribución log-normal, cuyo procedimiento se describe a continuación.

En el cálculo de la magnitud de la corriente, inicialmente se genera una variable normal estándar Z_n en el intervalo (0, 1), luego se calcula un valor del evento dado por la Ecuación (2.8) y finalmente se calcula la magnitud de la corriente mediante la Ecuación (2.9).

$$a_n = \mu_{lnI_p} + \sigma_{lnI_p} \cdot Z_n \quad (2.8)$$

$$I_p = e^{a_n} \quad (2.9)$$

En el cálculo del tiempo de frente, inicialmente se genera una segunda variable normal estándar Z_{n2} en el intervalo (0, 1), luego se calcula un valor del evento dado por la Ecuación (2.10) y finalmente se calcula tiempo de frente mediante la Ecuación (2.11).

$$b_n = \mu_{lnI_p}^* \mu_{lnI_p} + \sigma_{lnI_p}^* \cdot Z_{n2} \quad (2.10)$$

$$t_f = e^{b_n} \quad (2.11)$$

En el cálculo de la posición de la descarga con respecto a la línea, inicialmente se genera un conjunto $N_{gconjunto}$ conformado por la unión de tramos de probabilidad P_{vano_i} basados en la densidad de descargas a tierra de cada vano N_{gvanoi} y la longitud de cada vano x_{vano_i} mediante la Ecuación (2.12).

$$N_{gconjunto} = \bigcup_{i=1}^N P_{vano_i} = \bigcup_{i=1}^N \frac{N_{gvanoi} \cdot x_{vano_i}}{\sum_{i=1}^N N_{gvanoi} \cdot x_{vano_i}} \quad (2.12)$$

De esta forma se le da mayor probabilidad a los vanos con mayor densidad de descargas a tierra y mayor longitud. Luego, se genera una variable uniforme D_3 con valores en el intervalo (0, 1) que se compara mediante funciones lógicas con los tramos de

probabilidad del conjunto $N_{gconjunto}$. Por medio de esta comparación se encuentra el vano en el que impactó la descarga.

Las coordenadas x_d y y_d de la descarga se hallan generando dos variables aleatorias uniformes; D_1 en el intervalo $(x_{mínimo\ vano}, x_{máximo\ vano})$ correspondiente al tramo entre los límites mínimo y máximo en el eje x del vano seleccionado, y D_2 en el intervalo $(0, 1)$. A partir de estas variables se obtiene la posición de la descarga dentro del vano seleccionado mediante la Ecuación (2.13) y la Ecuación (2.14).

$$x_d = D_1 \tag{2.13}$$

$$y_d = D_2 \cdot y_{máximo} \tag{2.14}$$

Dado que es posible que algunas de estas descargas coincidan con impactos indirectos en el área de trabajo y no propiamente en la línea, es necesario discriminar cada una de las descargas y no tener en cuenta las que no impacten directamente la línea en las posteriores simulaciones de sobretensiones.

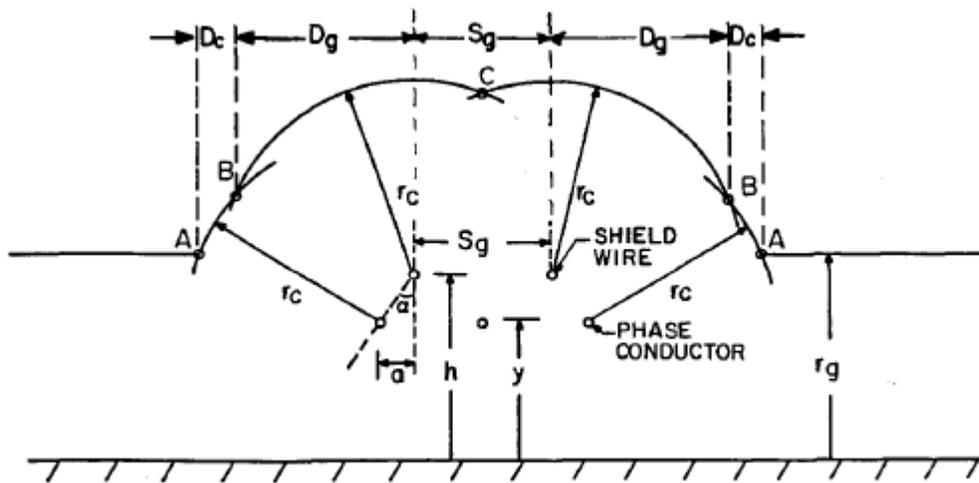
2.2 Discriminación de las descargas que corresponden a impactos directos

En este numeral se desarrollará el segundo proceso de la metodología de simulación propuesta correspondiente a la discriminación de las descargas que corresponden a impactos directos. Lo anterior, de acuerdo con el diagrama de flujo de la metodología propuesta para determinar el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas mostrado en la Figura 2-1.

Utilizando el método electrogeométrico [4] con base en los datos topológicos detallados de la línea de transmisión, la disposición física de las estructuras, la ubicación de la descarga y las magnitudes de corriente de la misma, se discriminan las descargas que corresponden a impactos directos en la línea de transmisión.

En la aplicación del método electrogeométrico el líder del canal de la descarga se asume vertical y perpendicular al terreno. A medida que el líder descende hacia la línea, este llega a un punto conocido como punto de impacto. En este punto, el último paso del canal del rayo iniciará la unión ya sea con la línea o con el terreno dependiendo de las llamadas distancias de impacto r_c y r_g , respectivamente. Estas distancias de impacto se muestran en la Figura 2-3 para conductores de fase y cables de guarda con alturas y y h , respectivamente.

Figura 2-3: Modelo geométrico, definición de ángulos y distancias (Tomado de [4]).



En la Figura 2-3, las intersecciones entre los arcos y las intersecciones de los arcos con la línea horizontal están marcadas como A, B y C. Los líderes descendentes que en su recorrido intersequen el arco entre A y B impactan en el conductor de fase. Aquellos que en su recorrido intersequen el arco entre B y C impactan en el cable de guarda, y aquellos que terminan más allá de A impactan en el suelo.

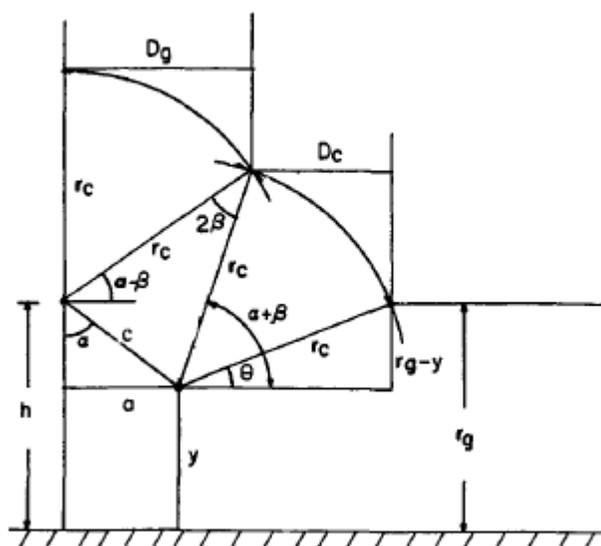
Las distancias de impacto r_c y r_g están relacionadas con la corriente de retorno de la descarga por medio de las siguientes relaciones:

$$r_c = A \cdot I^b \tag{2.15}$$

$$r_g = C \cdot I^d \tag{2.16}$$

Donde r_c y r_g están dadas en metros e I está dada en kiloamperios. Los valores de las constantes A , b , C y d han sido evaluados por diferentes autores, y en la literatura es posible encontrar diferentes combinaciones. En este caso los valores serán los dados por el Working Group de la IEEE [23]: $A = C = 8,0$ y $b = d = 0,65$.

Figura 2-4: Vista expandida de la Figura 2-3 (Tomado de [4]).



Las distancias D_c y D_g de la Figura 2-3 y la Figura 2-4 corresponden a las distancias de exposición del conductor de fase y del cable de guarda, respectivamente. Con la ayuda de la Figura 2-4 estas distancias pueden ser calculadas por medio de las siguientes expresiones:

$$D_c = r_c [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.17)$$

$$D_g = r_c \cos(\alpha - \beta) \quad (2.18)$$

donde:

$$\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2r_c}$$

$$c = \sqrt{a^2 + (h - y)^2}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y}$$

Si r_g es menor o igual a y , se hace θ igual a cero en la Ecuación (2.17). En la definición del ángulo β que se encuentra en la referencia [4] se tiene un error correspondiente a un factor de dos adicional, dicho error fue depurado en las ecuaciones utilizadas en el presente trabajo.

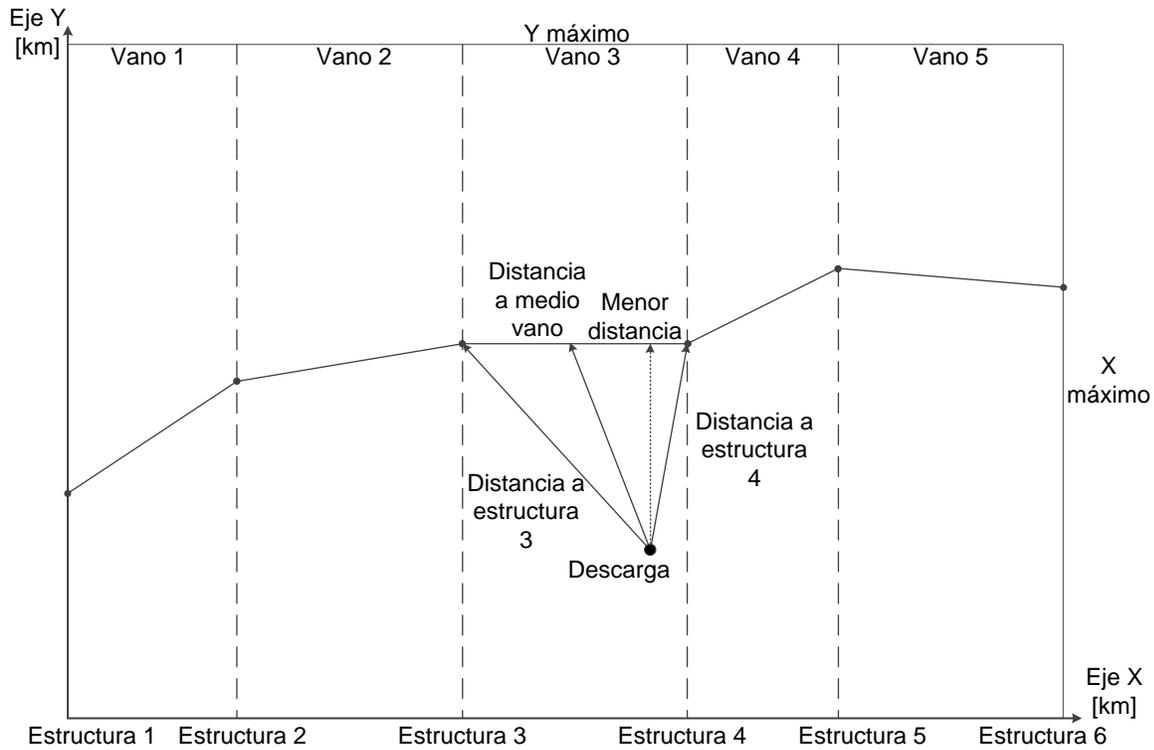
Las descargas de ubicación aleatoria localizadas en los vanos de la línea de transmisión que estén dentro de las áreas definidas por las distancias de exposición del conductor de fase y del cable de guarda serán consideradas en las simulaciones de las sobretensiones. Las demás descargas serán omitidas de las simulaciones pues corresponderán a impactos indirectos.

Con el fin de considerar la topología de la línea y las diferencias de altura de las estructuras, inicialmente se discrimina el área del vano en el cual impacta una descarga utilizando su ubicación y la ubicación de las diferentes estructuras en el eje x . Luego, se encuentra la menor distancia de la descarga a la línea como se muestra en la Figura 2-5. Con base en la menor distancia de la descarga y los valores de las estructuras propias del vano discriminado se aplica el método electrogeométrico.

Adicionalmente, se establece si la distancia de impacto fue menor con respecto a las estructuras de los extremos del vano o a medio vano y se almacena esta información junto con el conductor de fase o el cable de guarda impactados para su posterior simulación.

En la Figura 2-5 se presenta un ejemplo de las distancias de una descarga a una línea de transmisión. En la figura se puede observar que la descarga impacta a la línea en el área del vano 3 debido a que se encuentra entre las ubicaciones de las estructuras 3 y 4. En este caso, asumiendo que la distancia a estructura 4 es menor que la distancia a medio vano y a estructura 3, se puede determinar que el punto para simular la descarga corresponde a la estructura 4 según la menor distancia de la descarga a la línea definida anteriormente.

Figura 2-5: Distancias de la descarga a la línea de transmisión.



Como se mencionó anteriormente, la metodología de simulación busca tener en cuenta estructuras de cuatro, cinco, siete y ocho conductores, y cualquier modificación geométrica que cumpla con estas condiciones. Con este objetivo se generalizó el método electrogeométrico considerando todos los casos posibles a fin de discriminar adecuadamente los impactos incluyendo el circuito y la fase correspondiente.

2.3 Cálculo de sobretensiones en el ATP/EMTP

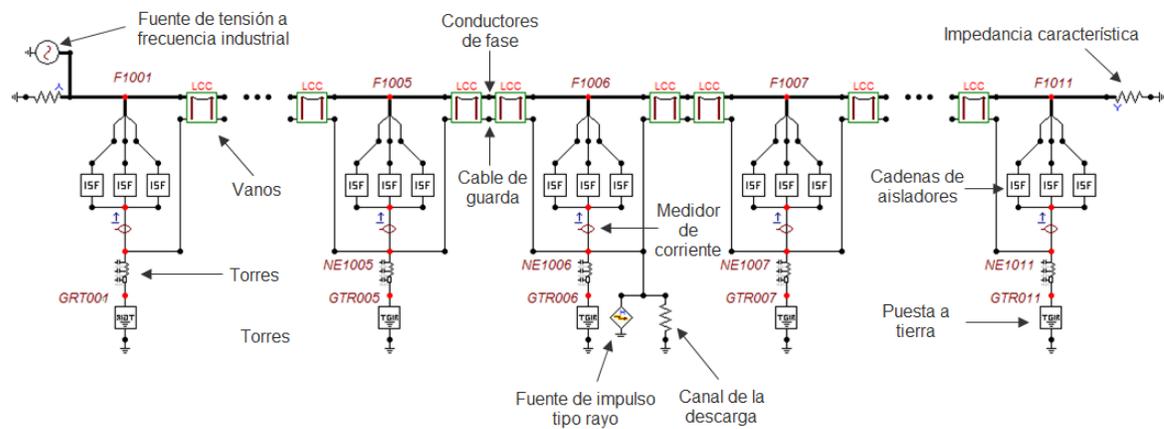
En este numeral se desarrollará el tercer proceso de la metodología de simulación propuesta correspondiente al cálculo de sobretensiones en el ATP/EMTP [12]. Lo anterior, de acuerdo con el diagrama de flujo de la metodología propuesta para determinar el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas mostrado en la Figura 2-1.

Para cada una de las descargas que corresponden a impactos directos se hallarán las corrientes y tensiones a lo largo de la línea, esto de acuerdo con nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra de cada estructura mediante el ATP/EMTP [12]. Los resultados de esta simulación se utilizarán para determinar cuáles impactos generan una falla de la línea de transmisión.

Con el fin de llevar a cabo las simulaciones, se deben identificar los principales modelos matemáticos existentes de los elementos constitutivos de la línea de transmisión y de su topología. Debido a que el fenómeno del rayo tiene un efecto representativo solo hasta algunos kilómetros del lugar de impacto, es posible simular solo un tramo de la línea de forma detallada. Por lo anterior, tomando como base la estructura en la cual ocurre un impacto directo, se genera un modelo de un segmento de línea aérea de transmisión para esta estructura y las cinco estructuras vecinas en cada dirección.

El modelo y las simulaciones se realizan sin la utilización del ATPDraw [41] sino por medio de la generación directa de los archivos “.atp” y “.dat”. Sin embargo, la Figura 2-6 muestra el esquema del sistema representado en esta herramienta.

Figura 2-6: Esquema del cálculo de sobretensiones para un tramo de línea.



Los principales elementos constitutivos de la línea de transmisión que conforman el modelo presentados en la Figura 2-6 se listan a continuación:

- Fuente de tensión a frecuencia industrial.

- Fuente de impulso tipo rayo.
- Impedancia característica.
- Canal de la descarga.
- Vanos.
- Estructuras.
- Cadenas de aisladores.
- Puestas a tierra.

A continuación se describen los principales modelos matemáticos existentes de los elementos constitutivos de la línea de transmisión con el fin de simular sus características de forma detallada.

2.3.1 Fuentes de impulso para rayo

Para el modelo del impulso tipo rayo se utiliza el modelo de fuente de corriente con impedancia característica del canal de la descarga igual a 400Ω [26]. La forma de onda a considerar será la tipo TYPE 15 – Heidler [42].

Los parámetros de amplitud y tiempo de frente con los que se configura el modelo corresponden a cada una de las descargas discriminadas en el numeral anterior como impactos directos. Esta fuente es conectada en la estructura o medio del vano y en el cable de guarda o en el conductor de fase que se haya determinado en el numeral anterior.

2.3.2 Vanos

Para modelar los tramos de línea de transmisión correspondientes a cada vano se utilizó el modelo JMarti del ATP/EMTP [12], el cual considera la variación de los parámetros con la frecuencia y usa matriz de transformación constante. La formulación del modelo se encuentra en la referencia [43] y las recomendaciones de ajuste en la referencia [41].

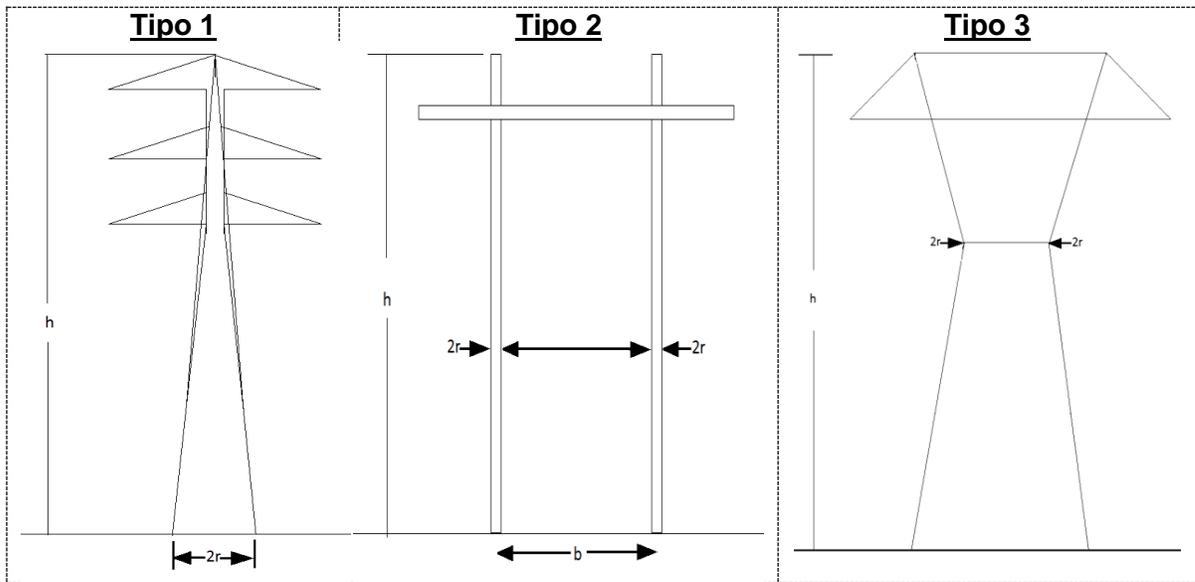
El modelo es configurado de acuerdo a la frecuencia adecuada para el tipo de fenómeno transitorio que se analizará. Para ello se ajusta el rango de frecuencias entre 0,1 Hz y

1 MHz, y la frecuencia de la matriz de transformación en 100 kHz. También, en esta subrutina se ingresan las características del conductor de fase, el conductor de guarda y su disposición en el tramo simulado.

2.3.3 Estructuras

Cada estructura de la línea de transmisión será representada por medio de su impedancia característica calculada según el tipo de estructura y sus dimensiones principales de acuerdo con lo recomendado en [23]. Los tipos de estructura a considerar con sus dimensiones se indican en la Figura 2-7.

Figura 2-7: Tipos de estructuras a considerar para el cálculo de impedancia característica (Tomado de [23]).



La impedancia característica Z_T en Ohmios [Ω] correspondiente a las estructuras Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3 se presenta en la Ecuación (2.19), la Ecuación (2.20) y la Ecuación (2.21), respectivamente.

$$Z_T = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \tag{2.19}$$

$$Z_T = \frac{1}{2} \left[\left(60 \ln \left(\frac{h}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{h} \right) - 60 \right) + \left(60 \ln \left(\frac{h}{b} \right) + 90 \left(\frac{b}{h} \right) - 60 \right) \right] \tag{2.20}$$

$$Z_T = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.21)$$

donde:

$h[m]$: es la altura de la estructura según se muestra en la Figura 2-7.

$r[m]$: es el radio de la estructura según se muestra en la Figura 2-7.

$b[m]$: es la separación de la estructura según se muestra en la Figura 2-7.

2.3.4 Cadena de aisladores

De acuerdo con el tipo de fenómeno estudiado y según lo recomendado por la norma IEC 60071-4 [44], se utiliza un modelo de propagación del líder para representar las cadenas de aisladores y evaluar su desempeño ante las sobretensiones generadas por descargas eléctricas atmosféricas.

El modelo propuesto por Shindo y Suzuki se toma de la referencia [45] y está basado en la referencia [46]. El modelo ha sido verificado con rangos de espacios que cubren los requerimientos de longitud de cadenas de aisladores en 500 kV. La Ecuación (2.22) muestra la formulación utilizada.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{k_1 \cdot V^2}{D - 2 \cdot L} + \frac{k_2 \cdot C_1 \cdot V^2 \cdot v \cdot L}{D \cdot (D - 2 \cdot L)} \quad (2.22)$$

donde:

$L[m]$: es la longitud del líder.

$k_1[m^2 \cdot kV^{-2} \cdot s^{-1}]$ y $k_2[m^2 \cdot kV^{-1} \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}]$: son constantes que dependen del tipo de configuración de electrodos.

$V[kV]$: es la tensión instantánea a través de la cadena de aisladores.

$D[m]$: es longitud de la cadena de aisladores.

$C_1[F/m]$: es la capacitancia por unidad de longitud del líder a la tierra.

$v[m/s]$: es la velocidad del líder.

La condición de flameo está dada por la Ecuación (2.23).

$$2 \cdot L \geq D \quad (2.23)$$

El modelo se implementa en el lenguaje MODELS [47] de acuerdo con la referencia [45], donde se encuentra el detalle de su implementación en el ATP/EMTP [12] y se parametriza de acuerdo con la longitud de arco seco de cada una de las estructuras, teniendo en cuenta el tipo de configuración de electrodos.

2.3.5 Puesta a tierra

De acuerdo con el tipo de fenómeno estudiado y según lo recomendado por la norma IEC 60071-4 [44], se utiliza un modelo de resistencia no lineal que considera el efecto de la ionización del suelo para representar la puesta a tierra de las estructuras y evaluar su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas.

El modelo propuesto por el CIGRE se toma de la referencia [48] y está basado en la referencia [36]. Las Ecuaciones (2.24) y (2.25) muestran la formulación utilizada.

$$R(I) = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (2.24)$$

$$I_g = \frac{E_0 \cdot \rho}{2\pi \cdot R_0^2} \quad (2.25)$$

donde:

$R_0[\Omega]$: Resistencia a baja corriente y baja frecuencia.

$I[A]$: Es la corriente de rayo que fluye a través del suelo.

$I_g[A]$: Umbral de corriente para iniciar la ionización del suelo.

$\rho[\Omega \cdot m]$: Resistividad del suelo.

$E_0[kV \cdot m^{-1}]$: Gradiente de ionización del suelo, valor recomendado: $E_0 \approx 400 \text{ kV} \cdot m^{-1}$.

El modelo se implementa en el lenguaje MODELS [47] de acuerdo con la referencia [48], donde se encuentra el detalle de su implementación en el ATP/EMTP [12] y se parametriza de acuerdo con la resistencia de puesta a tierra de cada una de las estructuras, teniendo en cuenta la resistividad del terreno.

2.3.6 Otros

Adicionalmente a los elementos descritos se representa la tensión previa a evento del sistema con una fuente de tensión ideal configurada a la tensión nominal del sistema y conectada a uno de los extremos de la línea de transmisión. Esta consideración, aunque no afecta en gran medida los resultados, puede generar que el flameo se presente con sobretensiones menores debido a la tensión previa establecida en los conductores de fase del sistema.

Además de esto, en los extremos de la línea de transmisión se consideró una resistencia con un valor aproximado a la impedancia característica de la línea para evitar las reflexiones en las fronteras del modelo.

2.4 Cálculo de la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas

En este numeral se desarrollará el cuarto proceso de la metodología de simulación propuesta correspondiente al cálculo de la tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas. Lo anterior, de acuerdo con el diagrama de flujo de la metodología propuesta para determinar el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas mostrado en la Figura 2-1.

A partir de los resultados del ATP/EMTP [12] se establecerá la tasa de falla por apantallamiento y la tasa de fallas por flameo inverso, y con base en estas dos se hallará la tasa de fallas de línea por cada cien kilómetros de línea por año. A continuación se presentan las consideraciones del proceso de la metodología de simulación correspondiente a este capítulo.

De los resultados arrojados por cada una de las simulaciones en ATP/EMTP [12] se obtienen los casos en los que se presentó una falla, utilizando un algoritmo que inicialmente extrae los resultados de la corriente que se presentó en los aisladores de los archivos de salida “.lis”. A partir de estos, el algoritmo mencionado evalúa cada uno de los valores y determina la ocurrencia de falla por medio de la superación de un umbral

predefinido. El medidor de corriente utilizado en las simulaciones es monofásico y se encuentra dispuesto entre el cable de guarda y los aisladores, como se ve en la Figura 2-6. Un ejemplo del proceso que realiza el algoritmo en cuestión se presenta en la Figura 2-8.

Figura 2-8: Ejemplo de evaluación de los archivos de salida.

	Torre 1		Torre 2		Torre 3		
	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 1	Circuito 2	
Simulación 1	Variable maxima :	,9589E-10	,9851E-10	,95363E-10	,790454E-9	,37609E-10	,40927E-10
	Variable minima :	-,1836E-22	-,2842E-13	-,1403E-22	-,1503E-12	-,1694E-22	-,4772E-9
Simulación 2	Variable maxima :	,39751E-10	,40359E-10	,51588E-10	,259156E-9	,124523E-9	,176088E-9
	Variable minima :	-,1571E-10	-,2065E-9	-,1262E-22	-,1628E-12	0,0	,70486E-11
Simulación 3	Variable maxima :	,70889E-10	,71822E-10	46888,8174	46888,8174	19860,9032	19860,9032
	Variable minima :	-,9505E-10	-,1734E-9	-2151,1511	-2151,1511	0,0	-,14494E-9
Simulación 4	Variable maxima :	,10268E-9	,105359E-9	,87298E-10	,407993E-9	,44624E-10	,209808E-9
	Variable minima :	-,2064E-22	-,5767E-10	-,15E-22	-,2315E-12	-,9937E-11	-,1046E-10
Simulación 5	Variable maxima :	,94058E-10	,306301E-9	3490,18744	,771962E-9	301,293973	,90949E-10
	Variable minima :	-,4712E-10	-,48E-10	-19362,268	-,2592E-10	-3641,3948	-,2819E-10

En la Figura 2-8 se tiene un segmento del archivo donde se extraen los resultados de los archivos de salida “.lis”, correspondientes a la simulación de una línea doble circuito de tres estructuras, por lo que se tienen seis medidores de corriente. Cada columna representa un medidor de corriente y cada dos filas se tienen los resultados de una simulación. También, en la simulación 3 enmarcada con el recuadro, se pueden observar valores pico de aproximadamente 47 kA y 20 kA indicando que se presentaron fallas en ambos circuitos de la estructura 2 y la estructura 3, respectivamente. Dichas fallas corresponden a una misma simulación y a un mismo impacto por lo que se contabiliza una falla para los resultados.

En el proceso de cálculo de tasa de fallas por descargas eléctricas atmosféricas se realiza el análisis anterior para cada uno de los impactos simulados, teniendo en cuenta si este impacto se presentó en un conductor de fase o en el cable de guarda, para generar así el valor fallas debidas a apantallamiento, a flameo inverso y totales.

Luego, estos valores son acondicionados mediante la Ecuación (2.26) con la longitud total de la línea $L_{línea}$ y los años utilizados en la simulación $N_{años}$ para entregarlos en las unidades correspondientes a la tasa de fallas de línea [fallas/(100 km-año)]. Cuando se

tenga un doble circuito la tasa de fallas presentada corresponderá a la mayor encontrada para un circuito entre ellos.

$$N_{Tcal} = \frac{100 \text{ km}}{L_{línea}} * \frac{1}{N_{años}} \quad (2.26)$$

donde:

N_{Tcal} [fallas/100 km /año]: Número de fallas totales calculadas

Una vez se establece el número de fallas totales calculadas mediante el proceso desarrollado en este capítulo, se procede a formular el problema de optimización mediante el cual se buscará especificar el nivel del aislamiento eléctrico óptimo y la resistencia de puesta a tierra óptima en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas. La formulación del problema de optimización se desarrolla en el siguiente capítulo.

3. Formulación del problema de optimización

En este capítulo se desarrollará el segundo proceso principal de la metodología de optimización correspondiente al método de optimización. Lo anterior, de acuerdo con el diagrama de flujo de la metodología de optimización propuesta mostrado en la Figura 1-3.

A continuación se plantea el problema de optimización estudiado y se selecciona e implementa el método de optimización que incorpora los criterios definidos en el capítulo 1 y los resultados provenientes de las simulaciones definidas en el capítulo 2. Lo anterior con el fin de especificar el nivel de aislamiento óptimo y la resistencia de puesta a tierra óptima de las líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas.

3.1 Planteamiento del problema de optimización inicial

El planteamiento del problema de optimización consta de la construcción de un modelo apropiado del problema estudiado. El modelado referente a optimización es el proceso de identificar y expresar en términos matemáticos principalmente la función de costo u objetivo, las variables y las restricciones del problema donde según [49], [50]:

- **Función de costo u objetivo:** es una medida cuantitativa del comportamiento del problema que se desea minimizar o maximizar.
- **Variables:** son los parámetros del sistema para los cuales se quiere encontrar los valores óptimos.
- **Restricciones:** son las funciones que describen las relaciones entre las variables y que definen los valores admisibles para las mismas.

Otro elemento presente en el modelo del problema estudiado corresponde al espacio de búsqueda. Este elemento está conformado por el número total de soluciones posibles

del problema y mediante su comparación con el número de soluciones evaluadas con el método de optimización seleccionado ayudará a evaluar la eficiencia de este último.

3.1.1 Función de costo

El objetivo del problema de optimización representado por la función de costo se presenta en la Ecuación (3.1):

$$f(x) = f(U_i, R_i, N_{Tcal}) = \sum_{i=1}^N (g_{Ui}(U_i) + g_{Ri}(R_i)) + g_{NT}(N_{Tcal}) \quad (3.1)$$

donde:

$i = 1, \dots, N$: Número de la estructura

$U_i[m]$: Longitud de arco seco de la estructura i

$R_i[\Omega]$: Resistencia de puesta a tierra de la estructura i

$N_{Tcal}[fallas/100 km /año]$: Número de fallas totales calculadas

$g_{ji}(\cdot)[\$]$: Costo de la característica j en la estructura i

$g_{NT}(\cdot)[\$]$: Costo asignado según N_{Tcal}

La Ecuación (3.1) fue planteada de tal forma que se relacionó el costo de la longitud de arco seco y la resistencia de puesta a tierra de cada una de las estructuras con el costo asignado según el número de fallas totales calculadas para la línea de transmisión.

Las funciones $g_{ji}(\cdot)$ y $g_{NT}(\cdot)$ que conforman la función de costo están dadas por:

$$g_{Ui}(U_i) = \left(\frac{U_i - U_{imin}}{\Delta U} \right) \cdot G(U) \quad (3.2)$$

$$g_{Ri}(R_i) = \left(\frac{R_{imax} - R_i}{\Delta R} \right) \cdot G(R) \quad (3.3)$$

$$g_{NT}(R_i) = (N_{Tcal} - N_{Tper}) \cdot G(N_T) \quad (3.4)$$

donde:

$U_{imin}[m]$: Valor mínimo de la longitud de arco seco de la estructura i

$R_{imax}[\Omega]$: Valor máximo de la resistencia de puesta a tierra de la estructura i

$N_{Tper}[fallas/100 km /año]$: Número de fallas totales permitidas

$G(U)[\$]$: Costo de un paso más de la longitud de arco seco

$G(R)[\$]$: Costo de un paso menos de la resistencia de puesta a tierra

$G(N_T)[\$]$: Costo del número de fallas totales

3.1.2 Variables

Las variables que conforman el vector de parámetros que serán usadas para optimizar la función de costo corresponden a la longitud de arco seco y la resistencia de puesta a tierra de cada una de las estructuras de la línea de transmisión, como se presenta en la Ecuación (3.5):

$$x = (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{1N}, x_{2N}) = (U_1, R_1, \dots, U_N, R_N) \quad (3.5)$$

donde:

$i = 1, \dots, N$: Número de la estructura

$U_i[m]$: Longitud de arco seco de la estructura i

$R_i[\Omega]$: Resistencia de puesta a tierra de la estructura i

3.1.3 Restricciones

Las restricciones de igualdad y de desigualdad que serán tenidas en cuenta en este problema de optimización se detallan a continuación.

3.1.3.1 Restricciones de igualdad $h(x) = 0$

Limitan la solución a cierto subconjunto del espacio de parámetros y están dadas por las restricciones físicas del fenómeno estudiado. En este caso están dadas por la correspondencia entre la tasa de fallas calculadas por medio de las simulaciones a través del ATP/EMPT [12] con base en unos parámetros determinados de longitud de arco seco, resistencia de puesta a tierra y demás parámetros del sistema, como se representa por la Ecuación (3.6):

$$N_{Tcal} = f(U_i, R_i, P_s) \quad (3.6)$$

donde:

P_s : Valores de los demás parámetros necesarios para realizar la simulación en ATP/EMTP [12], como por ejemplo, el nivel de tensión, resistividad del terreno, geometría de las estructuras, características del cable de guarda y de los conductores de fase, magnitud y tiempo de frente de la descarga, entre otros.

3.1.3.2 Restricciones de desigualdad $g(x) \leq 0$

Limitan la solución a una cierta región permitida del espacio de parámetros y están dadas por las restricciones propias del problema estudiado. En este caso están dadas por los límites mínimo y máximo de la longitud de arco seco y la resistencia de puesta a tierra (Ecuaciones (3.7) y (3.8)), y la restricción que indica que el número de fallas calculadas debe ser menor o igual que el número de fallas permitidas (Ecuación (3.9)).

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (3.7)$$

$$R_{imin} \leq R_i \leq R_{imax} \quad (3.8)$$

$$NT_{cal} \leq NT_{per} \quad (3.9)$$

donde:

$U_{imin}[m]$: Valor mínimo de la longitud de arco seco de la estructura i

$U_{imax}[m]$: Valor máximo de la longitud de arco seco de la estructura i

$R_{imin}[\Omega]$: Valor mínimo de la resistencia de puesta a tierra de la estructura i

$R_{imax}[\Omega]$: Valor máximo de la resistencia de puesta a tierra de la estructura i

3.1.4 Espacio de búsqueda

El espacio de búsqueda conformado por el número total de soluciones posibles estará dado por la siguiente ecuación:

$$E = \prod_{i=1}^N (U_{ipos} \cdot R_{ipos}) = \prod_{i=1}^N \left(\left(\frac{U_{imax} - U_{imin}}{\Delta U} + 1 \right) \cdot \left(\frac{R_{imax} - R_{imin}}{\Delta R} + 1 \right) \right) \quad (3.10)$$

donde:

U_{ipos} : Cantidad de valores que puede tomar la longitud de arco seco de la estructura i

R_{ipos} : Cantidad de valores que puede tomar la resistencia de puesta a tierra de la estructura i

$\Delta U[m]$: Paso de la longitud de arco seco, acorde a lo definido en el numeral 1.3.3

$\Delta R[\Omega]$: Paso de la resistencia de puesta a tierra, acorde a lo definido en el numeral 1.3.4

3.2 Selección del método de optimización

Según la referencia [50], dado un problema de optimización y un conjunto de métodos de optimización limitados, la selección del método de optimización más eficiente disponible puede realizarse mediante los siguientes pasos:

1. Simplificación del problema de optimización.
2. Determinación del método de optimización más eficiente disponible.
3. Determinación del criterio de parada.

A continuación se desarrollan estos pasos para el problema de optimización estudiado.

3.2.1 Simplificación del problema de optimización

La simplificación del problema de optimización consta de la simplificación de la función de costo y/o las restricciones.

En este trabajo la función de costo se asume como una función no lineal, no convexa y no diferenciable debido a que en la metodología utilizada no está disponible una expresión analítica para el cálculo del término N_{Tcal} [50]. Por lo anterior, no se puede simplificar la función de costos. Lo mismo ocurre con la restricción de igualdad del problema presentada en la Ecuación (3.6).

Por su parte, las restricciones de desigualdad se pueden simplificar incorporándolas a la función de costos, usando una función de penalización o barrera [50]. La idea básica consta de introducir una función de factibilidad $f_{feas}(x)$ en la función de costos $f(x)$ como se muestra en la Ecuación (3.11).

$$\min_x (f(x) + f_{feas}(x)) \quad (3.11)$$

donde:

$$f_{feas}(x) = 0 \quad \text{si} \quad \max_i g_i(x) \leq 0 \quad (3.12)$$

$$f_{feas}(x) = \infty \quad \text{si} \quad \max_i g_i(x) > 0 \quad (3.13)$$

$g_i(x)$: Restricción de desigualdad

$i = 1, \dots, m$: Número de la restricción

Las Ecuaciones (3.12) y (3.13) indican que la función de factibilidad se hace cero cuando se cumple la restricción y adopta un valor de infinito cuando la restricción se viola. De esta forma la optimización de la nueva función de costos se realiza encontrando el mínimo en una región permitida donde $g_i(x) \leq 0$.

Las formas aproximadas de la función de factibilidad, que facilitan su introducción a la función de costos, corresponden a la función de penalización y barrera. Las funciones de penalización $f_{pen}(x)$ tienen las siguientes propiedades y formas [50]:

$$f_{pen}(x) = 0 \quad \text{si} \quad \max_i g_i(x) \leq 0 \quad (3.14)$$

$$f_{pen}(x) \gg 0 \quad \text{si} \quad \max_i g_i(x) > 0 \quad (3.15)$$

$$f_{pen}(x) = \beta \sum_{i=1}^m \max(0, g_i(x)) \quad (3.16)$$

$$f_{pen}(x) = \beta \sum_{i=1}^m \max(0, g_i(x))^2 \quad (3.17)$$

$$f_{pen}(x) = \max_i \max(0, e^{\beta \cdot g_i(x)} - 1)^2 \quad (3.18)$$

donde:

$i = 1, \dots, m$: Número de la restricción

$g_i(x)$: Restricción de desigualdad

β : Es una constante con un valor mucho mayor que 1 ($\beta \gg 1$)

Las funciones de barrera $f_{bar}(x)$ tienen las siguientes propiedades y formas [50]:

$$f_{bar}(x) \approx 0 \quad \text{para} \quad \max_i g_i(x) \leq 0 \quad (3.19)$$

$$f_{bar}(x) \rightarrow \infty \quad \text{para} \quad \max_i g_i(x) \uparrow 0 \quad (3.20)$$

$$f_{bar}(x) = -\frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^m \log(-g_i(x)) \quad (3.21)$$

$$f_{bar}(x) = \sum_{i=1}^m -\frac{1}{\beta \cdot g_i(x)} \quad (3.22)$$

$$f_{bar}(x) = -\frac{1}{\beta} \log\left(-\max_i g_i(x)\right) \quad (3.23)$$

donde:

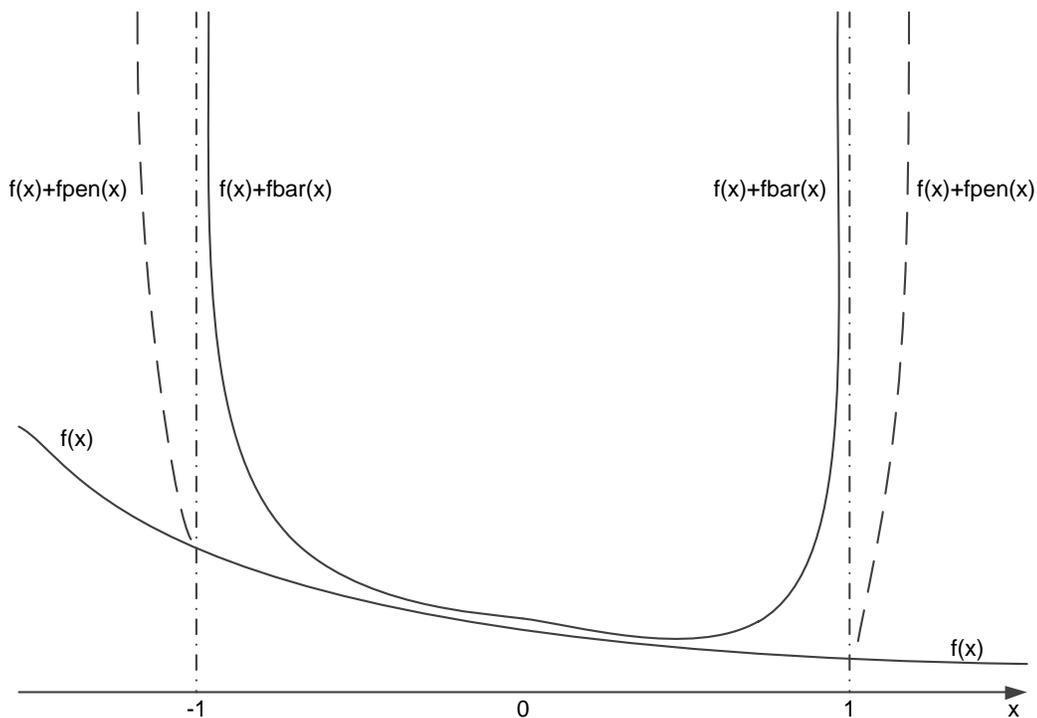
$i = 1, \dots, m$: Número de la restricción

$g_i(x)$: Restricción de desigualdad

β : Es una constante con un valor mayor que 1 ($\beta > 1$)

En la Figura 3-1 se presenta una función $f(x)$ con restricciones en los puntos -1 y 1. En dicha figura también se presenta la modificación de la función $f(x)$ generada por la función de penalización $f_{pen}(x)$ denotada como $f(x) + f_{pen}(x)$ y la modificación de la función $f(x)$ generada por la función de barrera $f_{bar}(x)$ denotada como $f(x) + f_{bar}(x)$.

Figura 3-1: Funciones de penalización y barrera (Tomado de [50]).



En la Figura 3-1 se puede observar que las funciones de penalización $f_{pen}(x)$ permiten incluir los valores límites sin modificar el valor de la función $f(x)$ entre ellos, mientras que las funciones de barrera $f_{bar}(x)$ generan asíntotas en los límites y modifica el valor de la función $f(x)$ entre ellos.

3.2.1.1 Simplificación de las restricciones

Con el fin de simplificar el problema de optimización se realizan las siguientes acciones:

- La restricción de igualdad dada por la Ecuación (3.6) estará incluida en la restricción de desigualdad dada por la Ecuación (3.9) pues comparten el término N_{Tcal} .
- Las restricciones de desigualdad serán simplificadas utilizando el método de la función de penalización con la forma de la Ecuación (3.16). Esto último con el fin de utilizar la ecuación de penalización más simple que permita incluir los valores límites de las variables estudiadas.

La función de penalización propia del problema a partir de la cual se eliminarán las restricciones existentes está planteada en la Ecuación (3.24):

$$f_{pen}(U_i, R_i, N_{Tcal}) = \beta [g_{resU}(U_i) + g_{resR}(R_i) + \max(0, g_{resNT}(N_{Tcal}))] \quad (3.24)$$

donde:

β : Es una constante con un valor mucho mayor que 1 ($\beta = 10^9$)

$g_{resU}(U_i)$: Función por tramos basada en la restricción de desigualdad que depende del valor de la longitud de arco seco de cada estructura y está definida como se muestra a continuación:

$$g_{resU}(U_i) = \begin{cases} 0, & \text{si } U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \\ 1, & \text{si } U_{imin} > U_i \text{ o } U_i > U_{imax} \end{cases} \quad (3.25)$$

$g_{resR}(R_i)$: Función por tramos basada en la restricción de desigualdad que depende del valor de la resistencia de puesta a tierra de cada estructura y está definida como se muestra a continuación:

$$g_{resR}(R_i) = \begin{cases} 0, & \text{si } R_{imin} \leq R_i \leq R_{imax} \\ 1, & \text{si } R_{imin} > R_i \text{ o } R_i > R_{imax} \end{cases} \quad (3.26)$$

$g_{resNT}(N_{Tcal})$: Función basada en la restricción de desigualdad que depende del número de fallas calculadas y está definida como se muestra a continuación:

$$g_{resNT}(N_{Tcal}) = N_{Tcal} - N_{Tper} \quad (3.27)$$

3.2.1.2 Modificación de la función de costo

En la función de costos de la Ecuación (3.1), definida en el planteamiento del problema de optimización inicial, se reemplaza el término $g_{NT}(N_{Tcal})$ por $g_{pen}(U_i, R_i, N_{Tcal})$ generando la nueva función de costos de que se muestra en la Ecuación (3.28). Lo anterior con el fin de introducir la función de penalización propia del problema y de esta manera eliminar las restricciones.

$$f(x) = f(U_i, R_i, N_{Tcal}) = \sum_{i=1}^N (g_{Ui}(U_i) + g_{Ri}(R_i)) + f_{pen}(U_i, R_i, N_{Tcal}) \quad (3.28)$$

donde:

$i = 1, \dots, N$: Número de estructuras

$U_i[m]$: Longitud de arco seco de la estructura i

$R_i[\Omega]$: Resistencia de puesta a tierra de la estructura i

$N_{Tcal}[fallas/100 km /año]$: Número de fallas totales calculadas

$g_{ji}(\cdot)[\$]$: Costo de la característica j en la región i

$f_{pen}(\cdot)[\$]$: Costo dado por la función de penalización

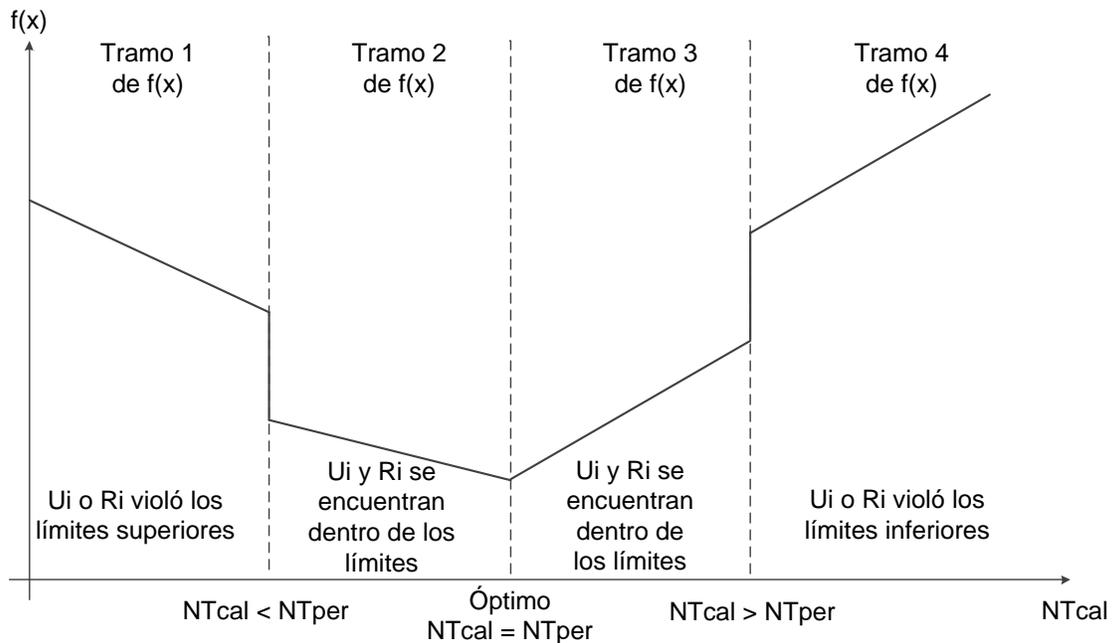
En la Figura 3-2 se presenta a modo de ejemplo la descripción gráfica de la función de costo $f(x)$ en función del número de fallas totales calculadas N_{Tcal} . Cabe anotar que en esta figura solo se presenta una aproximación ilustrativa del comportamiento de la función, esto debido a que no se está graficando la dependencia de la función de costo con los valores de longitud de arco seco y la resistencia de puesta a tierra de cada estructura.

En la Figura 3-2 se observa que el valor óptimo de la función se presenta en este caso cuando $N_{Tcal} = N_{Tper}$. Para los tramos 1 y 2 de $f(x)$ se tiene que $N_{Tcal} < N_{Tper}$ y para los tramos 3 y 4 de $f(x)$ se tiene que $N_{Tcal} > N_{Tper}$. Las características principales de cada tramo se presentan a continuación:

- Tramo 1 de $f(x)$: El costo resultante está dado por los costos $g_{Ui}(U_i)$ y $g_{Ri}(R_i)$ más el costo de penalización $f_{pen}(U_i, R_i)$ respecto a la violación de los límites superiores de las variables.

- Tramo 2 de $f(x)$: El costo resultante está dado por los costos $g_{U_i}(U_i)$ y $g_{R_i}(R_i)$ sin ningún costo de penalización.
- Tramo 3 de $f(x)$: El costo resultante está dado por los costos $g_{U_i}(U_i)$ y $g_{R_i}(R_i)$ más el costo de penalización $f_{pen}(N_{Tcal})$ respecto a la superación del número de fallas totales permitidas.
- Tramo 4 de $f(x)$: El costo resultante está dado por el costo de penalización $f_{pen}(N_{Tcal})$ respecto a la superación del número de fallas totales permitidas más el costo de penalización $g_{pen}(U_i, R_i)$ respecto a la violación de los límites inferiores de las variables.

Figura 3-2: Descripción grafica de la función de costo.



3.2.1.3 Resumen de la simplificación del problema de optimización

En la Tabla 3-1 se presenta un cuadro comparativo entre las principales características del problema de optimización inicial y el simplificado. En esta tabla se puede observar que la función de costos tiene las mismas características en ambos casos, mientras que

las restricciones fueron eliminadas para el caso del problema de optimización simplificado. De esta manera se obtiene un problema de optimización con una función de costo no lineal, no convexa y no diferenciable, sin restricciones, para el cual existen métodos de solución eficientes respecto al problema obtenido inicialmente.

Tabla 3-1: Resumen de las principales características del problema de optimización inicial y simplificado.

Elemento	Problema de optimización	
	Inicial	Simplificado
Función de costo	No lineal No convexa No diferenciable	No lineal No convexa No diferenciable
Restricciones	Con restricciones de igualdad y de desigualdad	Sin restricciones

3.2.2 Determinación del método de optimización

Para problemas no lineales, no convexos y sin restricciones es usualmente mejor usar la información del gradiente y del Hesiano que pueden ser calculados eficientemente si una expresión analítica está disponible [50]. En estos casos, se utilizan algunas de las técnicas clasificadas dentro de métodos iterativos, como el de Newton-Raphson, Levenberg-Marquardt y métodos cuasi-Newton [21], [49], [50].

Si la expresión analítica no está disponible como corresponde a este trabajo, el gradiente puede ser calculado numéricamente utilizando diferencias finitas o análisis por pasos es decir, por medio de una técnica de iteración [50]. En estos casos, se utilizan algunas técnicas clasificadas dentro de métodos con determinación de dirección y línea de búsqueda. Los algoritmos recomendados en las referencias son el método perpendicular de Powell o el método de Nelder-Mead [21], [49], [50].

En la referencia [50] se presenta una discriminación de los métodos de optimización más eficientes disponibles según las características del problema de optimización que se tenga. Utilizando dicha discriminación se encuentra que para este caso los métodos de optimización más eficientes disponibles corresponden al método perpendicular de Powell o al método de Nelder-Mead. Finalmente, debido a que el método perpendicular de

Powell requiere de un número mayor de evaluaciones respecto al de Nelder-Mead y a que en este caso se utiliza un programa de simulación externo para la evaluación de la función de costo, que representa un tiempo de cálculo mayor, se selecciona el método Simplex de Nelder y Mead [51].

Teniendo en cuenta que el método Simplex de Nelder y Mead es un algoritmo de carácter local que carece de alguna componente aleatoria [52] y a que la función objetivo estudiada en este trabajo es compleja debido a que es no lineal, no convexa y no diferenciable según lo explicado en el numeral anterior, se propone un segundo método de optimización heurístico. Este último método estará basado en el conocimiento práctico que se tiene del desempeño de las líneas de transmisión ante descargas atmosféricas. Finalmente, se busca que ambos métodos sean complementarios de tal forma que se encuentre una solución óptima práctica, evitando problemas de convergencia en óptimos locales que puedan ser generados por las aproximaciones numéricas involucradas en el planteamiento del problema de optimización.

3.2.3 Determinación del criterio de parada

Para el método de Nelder y Mead según lo indicado en [51] se plantea usar un criterio de parada basado en el error estándar de las soluciones generadas, que se muestra en la siguiente expresión:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(p_i - \bar{p})^2}{n}} \leq \varepsilon_f \quad (3.29)$$

donde:

$i = 1, \dots, n$: Número de dimensiones del problema

p_i : Puntos del simplex

\bar{p} : Centroide definido como:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3.30)$$

ε_f : Valor del error de convergencia $\varepsilon_f > 1$, en el caso específico de este trabajo y de este método $\varepsilon_f = 1$

Con relación al método heurístico, debido a que en este problema en específico no se tiene un gradiente o Jacobiano disponible se plantea usar un criterio de parada también heurístico el cual se muestra en la siguiente expresión [50]:

$$\varepsilon_{fk-1} < 0 \text{ y } \varepsilon_{fk} \geq 0 \text{ ó } \varepsilon_{fk-1} > 0 \text{ y } \varepsilon_{fk} \leq 0 \quad (3.31)$$

donde:

k : Número de la simulación actual

ε_f : Valor del error de convergencia definido como:

$$\varepsilon_f = N_{Tper} - N_{Tcal} \quad (3.32)$$

3.3 Método de optimización – Método de Nelder-Mead modificado

El simplex de Nelder-Mead, también denominado simplex no-lineal, corresponde a un algoritmo heurístico propuesto por John Nelder y Roger Mead en 1965 [51] para la optimización de funciones de costo sin restricciones; este algoritmo fue diseñado para ser eficaz y computacionalmente compacto. Eficaz debido a la capacidad de obtener el óptimo buscado y computacionalmente compacto debido al número y tipo de instrucciones algebraicas y lógicas que se utilizan [51]. Dicho método sólo usa valores de la función de costo y no de su derivada [52].

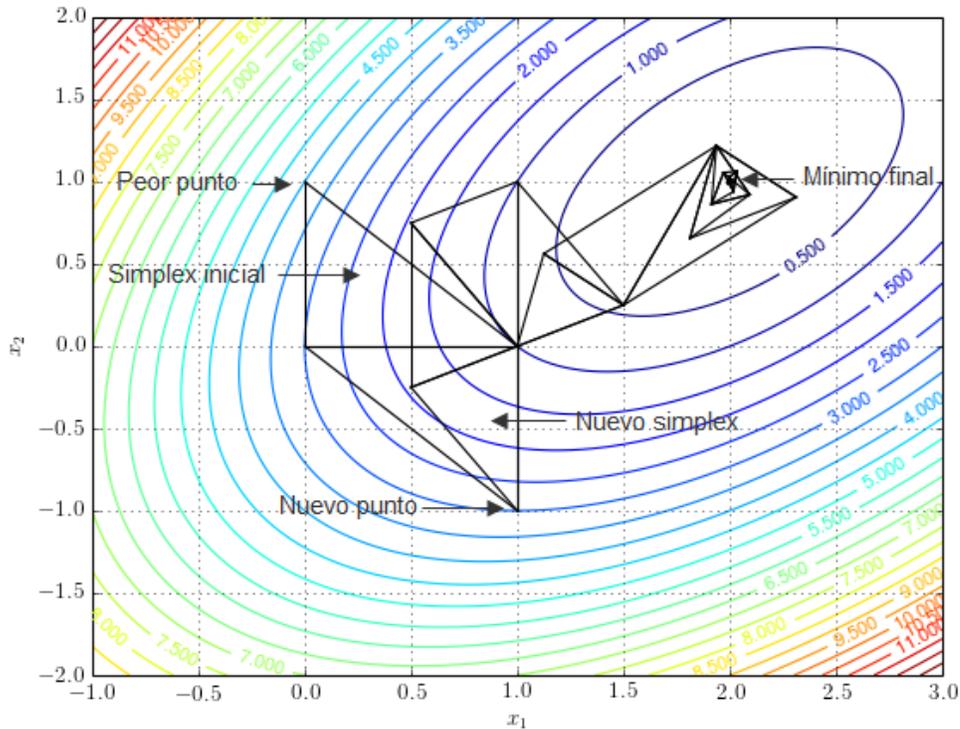
El método de Nelder-Mead originalmente fue diseñado para su implementación en problemas de variables continuas [51], pero debido a las particularidades expuestas en el numeral 3.1 del problema desarrollado en este trabajo se utilizarán valores discretos en los cálculos. Debido a lo anterior el método de optimización de Nelder-Mead se modificó con las consideraciones que explican en el numeral 3.3.2 de este trabajo.

3.3.1 Descripción

El método de Nelder-Mead se basa en conceptos geométricos y consiste en la minimización de una función de n variables, que depende de la comparación de los valores de la función en $n + 1$ vértices de un simplex general, seguido de la sustitución

del vértice con el valor más alto por otro punto. El simplex se adapta al paisaje local y se contrae al mínimo final. Un ejemplo de la aplicación del método se presenta en la Figura 3-3.

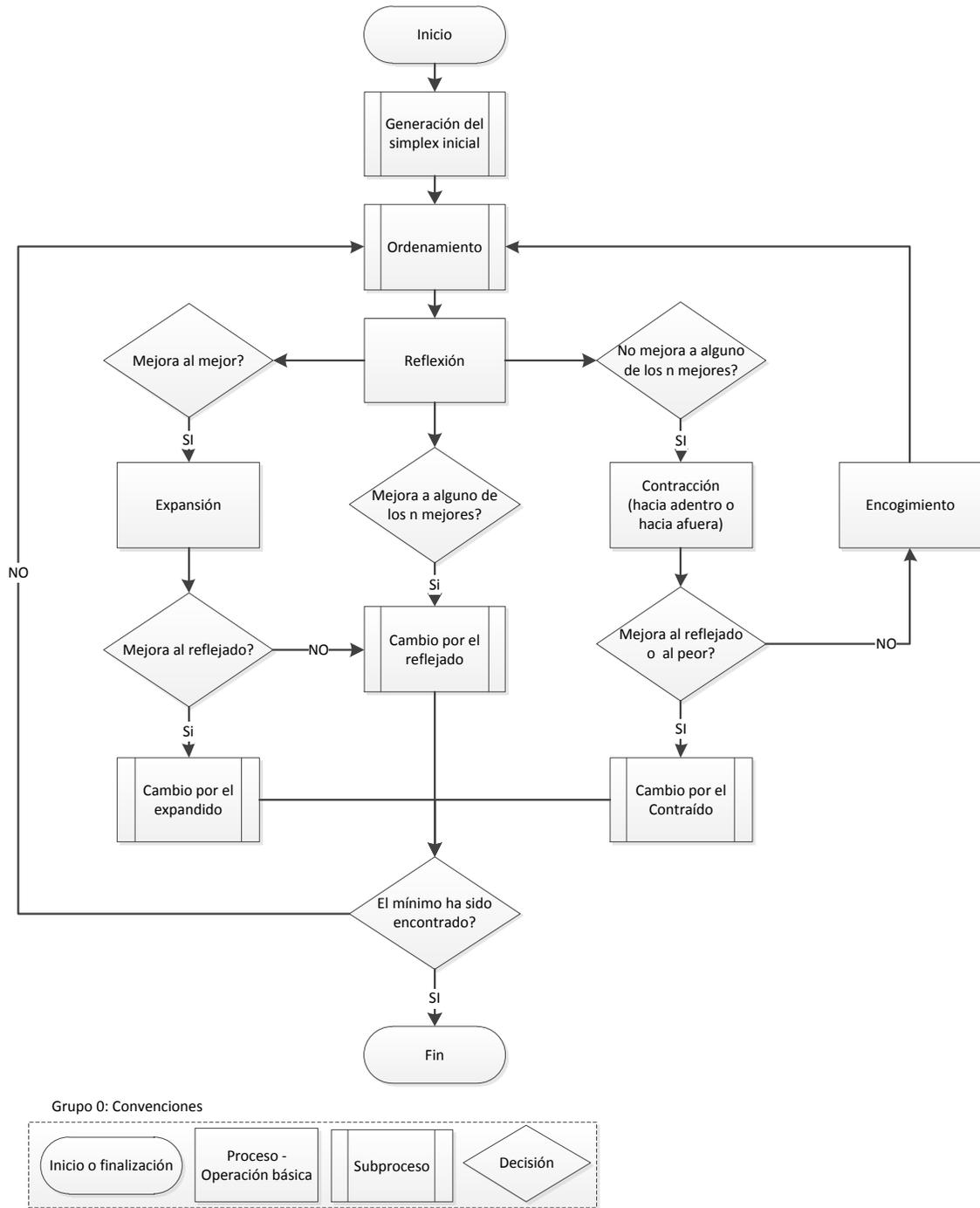
Figura 3-3: Ejemplo de aplicación del método de Nelder-Mead (Tomado de [53]).



En la Figura 3-3 se puede observar la aplicación del método de Nelder-Mead a una función de dos variables x_1 y x_2 . En este caso el simplex inicial corresponde al triángulo formado por tres vértices entre los que se encuentra el punto con el valor más alto de la función denominado el peor punto. Este último es sustituido por el nuevo punto mediante cuatro operaciones matemáticas básicas denominadas reflexión, expansión, contracción y encogimiento, obteniendo así un nuevo simplex. Finalmente, las sustituciones de estos puntos se continúan realizando con base al método hasta que se encuentra el mínimo final.

En la Figura 3-4 se presenta el diagrama de flujo del método de Nelder-Mead.

Figura 3-4: Diagrama de flujo del método de Nelder-Mead.



En la Figura 3-4 se puede observar que el método parte de la generación del simplex inicial correspondiente a una serie de puntos con su respectiva evaluación mediante la función de costo. El simplex es ordenado en el subproceso de ordenamiento del mejor al

peor punto para posteriormente ejecutar el primer proceso correspondiente a la reflexión. Dependiendo de si el punto generado mediante la reflexión mejora al mejor punto, mejora a alguno de los n mejores o no mejora a ninguno de los n mejores se realiza una expansión, se toma el punto reflejado o se realiza una contracción, respectivamente.

Un caso especial del método se presenta cuando el punto generado por la contracción no mejora al punto reflejado o al peor punto, en este caso se realiza el proceso de encogimiento. Luego de la realización del proceso correspondiente, se cambia el peor punto mediante los subprocesos por el punto reflejado, contraído o expandido según sea el caso. Por último, se evalúa si el mínimo ha sido encontrado, si esta decisión es afirmativa se da por finalizado el método, en caso de ser negativa se regresa al comienzo del método realizando nuevamente el proceso de ordenamiento hasta que finalmente el mínimo de la función de costo sea encontrado.

Como se mencionó anteriormente, la modificación del simplex se hace con base en cuatro operaciones básicas: reflexión, expansión, contracción y encogimiento, que llevan asociados cuatro parámetros respectivamente denotados ρ , χ , γ y σ . Siguiendo el algoritmo de Nelder-Mead dichos parámetros deben satisfacer: $\rho > 0$, $\chi > 1$, $0 < \gamma < 1$, $0 < \sigma < 1$ y $\chi > \rho$ [51], [52]. Las principales operaciones del método que se muestran en la Figura 3-4 corresponden a:

▪ **Reflexión:**

$$p_r = \bar{p} + \rho(\bar{p} - p_{n+1}) \quad (3.33)$$

donde:

p_r : Punto reflejado

p_{n+1} : Peor punto

\bar{p} : Centroide definido como:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3.34)$$

n : Dimensiones del problema

▪ **Expansión:**

$$p_e = \bar{p} + \chi(p_r - \bar{p}) \quad (3.35)$$

donde:

p_e : Punto expandido

▪ **Contracción:**

La contracción se hace hacia el punto reflejado o hacia el peor punto dependiendo de cuál sea mejor de los dos:

- Hacia fuera: si el punto reflejado es mejor que el peor

$$p_{out} = \bar{p} + \gamma(p_r - \bar{p}) \quad (3.36)$$

donde:

p_{out} : Punto contraído hacia fuera

- Hacia dentro: si el punto reflejado iguala o empeora al peor

$$p_{in} = \bar{p} - \gamma(\bar{p} - p_{n+1}) \quad (3.37)$$

donde:

p_{in} : Punto contraído hacia dentro

▪ **Encogimiento:**

En el encogimiento se toman n puntos nuevos de la forma:

$$v_i = p_1 - \sigma(p_1 - p_i) \quad (3.38)$$

donde:

v_i : Nuevo vector de solución para el simplex

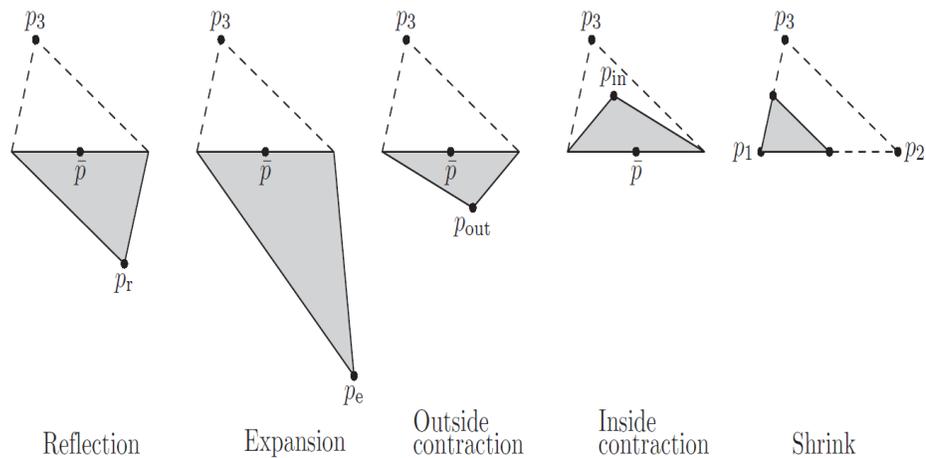
p_1 : Mejor punto

p_i : Soluciones con $i = 2, \dots, n + 1$

En la Figura 3-5 se ilustra geoméricamente el significado de las principales operaciones del método de Nelder-Mead. En esta figura se puede observar el simplex inicial limitado

por los puntos p_1 , p_2 y p_3 , en este caso p_3 corresponde al peor punto y p_1 al mejor, se puede observar el centroide \bar{p} , el punto reflejado p_r , el punto expandido p_e , el punto contraído hacia fuera p_{out} , el punto contraído hacia dentro p_{in} y finalmente un encogimiento.

Figura 3-5: Descripción geométrica de las operaciones del método (Tomado de [54]).



3.3.2 Implementación

El método de Nelder-Mead, cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 3-4, fue adaptado y modificado para su aplicación en el problema específico desarrollado en este trabajo y fue implementado con sus cuatro operaciones básicas en la herramienta de cálculo presentada en el Anexo 1. Para realizar dicha implementación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones.

Los valores adoptados de los parámetros de las cuatro operaciones básicas son: $\rho = 1$, $\chi = 2$, $\gamma = 0,5$ y $\sigma = 0,5$ según lo recomendado por las referencias [51], [52]. Se define el espacio de trabajo como sigue a continuación:

- N : Número de estructuras
- $2N$: Número de parámetros correspondientes a longitud de arco seco y resistencia de puesta a tierra de todas las estructuras
- $2N + 1$: Dimensiones del simplex inicial que corresponden a las aproximaciones iniciales al punto óptimo buscado

Se definen y simulan las $2N + 1$ aproximaciones iniciales al punto óptimo buscado. Para esto se realizan los siguientes cálculos:

- Se simula el caso adicional con los valores más cercanos a los valores medios de la longitud de arco seco y la resistencia de puesta a tierra de cada estructura.
- Se simulan la mitad de los casos N aumentando en cada estructura la longitud de arco seco en un paso.
- Se simulan la mitad de los casos N aumentando en cada estructura la resistencia de puesta a tierra en un paso.

En este trabajo, debido a las particularidades del problema se utilizan valores discretos, es decir que se realizan los cálculos de las operaciones y luego se aproximan a los valores más cercanos correspondientes a la longitud de arco seco y a la resistencia de puesta a tierra teniendo en cuenta los valores de los pasos adoptados en los criterios del numeral 1.3.3 y el numeral 1.3.4 de este documento. Por esta razón, el método de Nelder-Mead utilizado en la metodología de optimización del presente trabajo se considera modificado.

Durante el proceso se vigilan los límites máximos, mínimos y de convergencia que se obtienen en la línea de transmisión con la información de entrada, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si se tiene el máximo valor de la longitud de arco seco y el mínimo de la resistencia de puesta a tierra en todas las estructuras y se está por encima del valor de fallas totales permitidas se procede a detener la simulación. Lo anterior debido a que aunque se tienen las mejores condiciones posibles para la línea no se puede obtener el número de fallas totales permitidas.
- Si se tiene el mínimo valor de la longitud de arco seco y el máximo de la resistencia de puesta a tierra en todas las estructuras y se está por debajo del valor de fallas totales permitidas se procede a detener la simulación. Lo anterior debido a que aunque se tienen las peores condiciones posibles para la línea se puede obtener el número de fallas totales permitidas.
- Si se llega a un valor máximo definido de simulaciones o tiempo determinados y no se obtiene convergencia en la simulación, se procede a detener la simulación. Lo

anterior debido a que posiblemente los parámetros de la simulación no permiten obtener los tiempos de convergencia esperados.

3.4 Método de optimización – Método heurístico

El método heurístico propuesto en este trabajo corresponde a un algoritmo generado para la optimización de la función de costo sin restricciones. Este algoritmo fue diseñado para ser práctico y computacionalmente compacto. Práctico debido a que se basa en conceptos provenientes de la experiencia y la aplicación en campo del diseño de líneas de transmisión [1] y computacionalmente compacto debido al número y tipo de instrucciones matemáticas y lógicas que se utilizan [51]. Dicho método sólo usa valores de la función de costo y no de su derivada.

3.4.1 Descripción

El método heurístico se basa en conceptos prácticos del desempeño de las líneas de transmisión ante descargas eléctricas atmosféricas. Como conceptos prácticos se adoptan las medidas tomadas en la referencia [1], las cuales apuntan a discriminar las estructuras de la línea de transmisión según el número de fallas presentadas en cada una de ellas, y con base en esta discriminación se mejora el aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra solo en las estructuras que presenten un mayor número de fallas. Según lo anterior, se entenderán como soluciones esperadas en la práctica a aquellas en las que se realicen modificaciones en las estructuras que presenten un mayor número de fallas, teniendo en cuenta las condiciones del lugar y que dichas soluciones sean viables técnica y económicamente para su aplicación.

Según esto, el método heurístico propuesto en este trabajo consiste en mejorar sistemáticamente los parámetros correspondientes al nivel aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en las estructuras que presenten mayor número de fallas cuando se tiene un número de fallas calculadas mayor a las permitidas. Si se tiene un número de fallas calculadas menor a las permitidas, se desmejoran sistemáticamente los parámetros correspondientes al nivel aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en las estructuras que presenten un menor número de fallas.

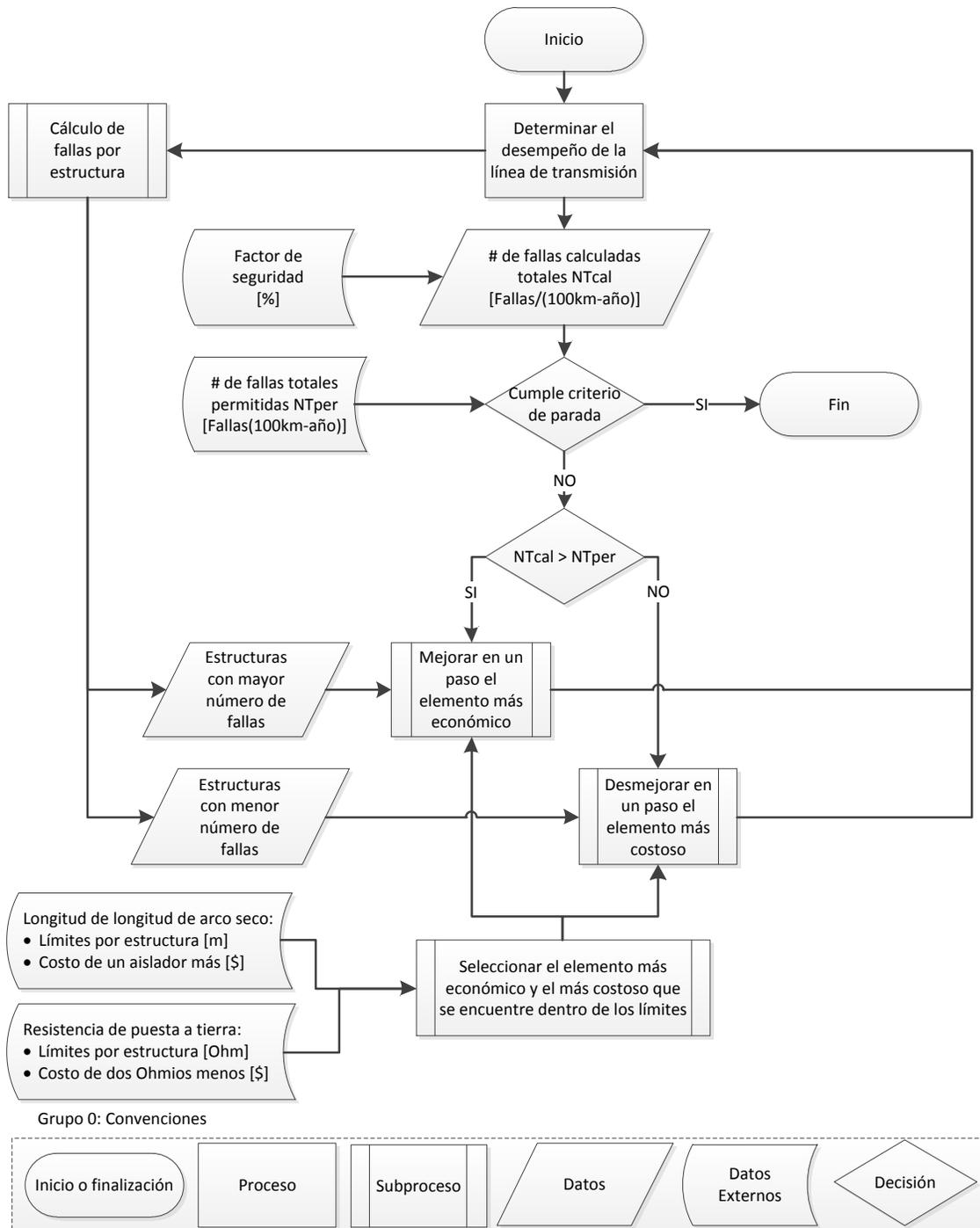
En la Figura 3-6 se presenta el diagrama de flujo del método heurístico. En esta figura se puede observar que el método parte del proceso de determinación del desempeño de la línea de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas, mediante el cual se obtiene el número de fallas calculadas totales y por cada una de las estructuras. Posteriormente, utilizando el número de fallas calculadas multiplicado por un factor de seguridad de diseño y el número de fallas permitidas totales se evalúa el criterio de parada descrito en el numeral 3.2.3 de este documento; si se cumple dicho criterio se da por finalizada la simulación. En caso contrario, si el número de salidas calculadas es mayor o menor al número de salidas permitidas, se procede a mejorar o desmejorar los parámetros correspondientes al nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra.

Como se puede observar en la Figura 3-6, se discriminan los datos correspondientes a las estructuras con mayor y menor número de fallas a partir del subproceso del cálculo de fallas por estructura. En otro subproceso se selecciona el elemento más económico y el más costoso que se encuentre dentro de los límites a partir de los datos externos del costo de cada paso y de los límites por estructura de los parámetros. En dos subprocesos se realiza la modificación de los parámetros así; si el número de fallas calculadas es menor al número de fallas permitidas totales se mejora en un paso el elemento más económico en las estructuras con mayor número de fallas, en caso contrario, se desmejora en un paso el elemento más costoso en las estructuras con menor número de fallas según sea el caso. Por último, se realiza nuevamente el proceso de determinar el desempeño de la línea de transmisión con los parámetros modificados hasta que finalmente se cumpla con el criterio de parada.

En este método heurístico las modificaciones de los parámetros se realizan de un paso a la vez y en la estructura con el mayor o menor número de fallas, según aplique. Si se tienen varias estructuras con el mismo número de salidas correspondiente al mayor o menor se realizan las modificaciones en los parámetros de cada una de ellas. También se realizan las modificaciones dándole prioridad al parámetro más económico o más costoso para mejorar o desmejorar, mientras dichos parámetros se encuentren dentro de los límites. Cuando se llega al límite en uno de los parámetros se continúa modificando el parámetro restante sin importar la condición de costo. Finalmente, en caso de que

tengan valores de costo iguales se comenzará a modificar cada uno de los parámetros intercaladamente.

Figura 3-6: Diagrama de flujo del método heurístico.



3.4.2 Implementación

El método heurístico, cuyo diagrama de flujo se presenta en la Figura 3-6, fue desarrollado para el problema específico tratado en este trabajo y fue implementado en la herramienta de cálculo presentada en el Anexo 1. Para realizar dicha implementación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones. En este trabajo, debido a las particularidades del problema se utilizan valores discretos para la longitud de arco seco y a la resistencia de puesta a tierra, teniendo en cuenta los valores de los pasos adoptados en los criterios del numeral 1.3.3 y el numeral 1.3.4 de este documento.

Inicialmente se estudian los límites máximos, mínimos y de convergencia que se pueden obtener en la línea de transmisión con la información de entrada, teniendo en cuenta las mismas consideraciones del numeral 3.3.2 de este documento.

Como se mencionó inicialmente en los capítulos 2 y 3 de este trabajo fueron desarrollados en detalle los dos procesos principales que contempla la metodología de optimización: La determinación del desempeño de las líneas de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas y el método de optimización. Por tanto, en el siguiente capítulo se realizarán una serie de validaciones enfocadas a dichos procesos principales.

4. Validación y resultados de la metodología de optimización

Con el fin de realizar la validación de la metodología de optimización propuesta en este trabajo se efectuaron una serie de cálculos destinados a obtener resultados comparables con los valores generados por medio de métodos existentes que se encuentran en la bibliografía, tanto para cada uno de los componentes de la metodología de optimización propuesta como para la metodología de optimización completa.

Paralelamente a la metodología optimización, se elaboró una herramienta de cálculo que contiene los mismos lineamientos y vincula las diferentes herramientas utilizadas en dicha metodología con el fin de obtener de forma práctica los resultados buscados. En el Anexo 1 se encuentra una breve descripción de las principales características de la herramienta desarrollada, que fue llamada Optimal Transmission Lines y que será citada en este trabajo por sus siglas OTL.

4.1 Validación de la generación de descargas

Se realizaron dos casos con el fin de validar la generación aleatoria de las descargas eléctricas atmosféricas planteada en el numeral 2.1 de este trabajo. El primero de estos ejercicios está enfocado en la distribución de probabilidad de la descarga, mientras que el segundo está enfocado en la densidad de descargas a tierra. El planteamiento y los resultados de dichos casos se presentan a continuación.

4.1.1 Caso 1: Distribución de probabilidad de la descarga

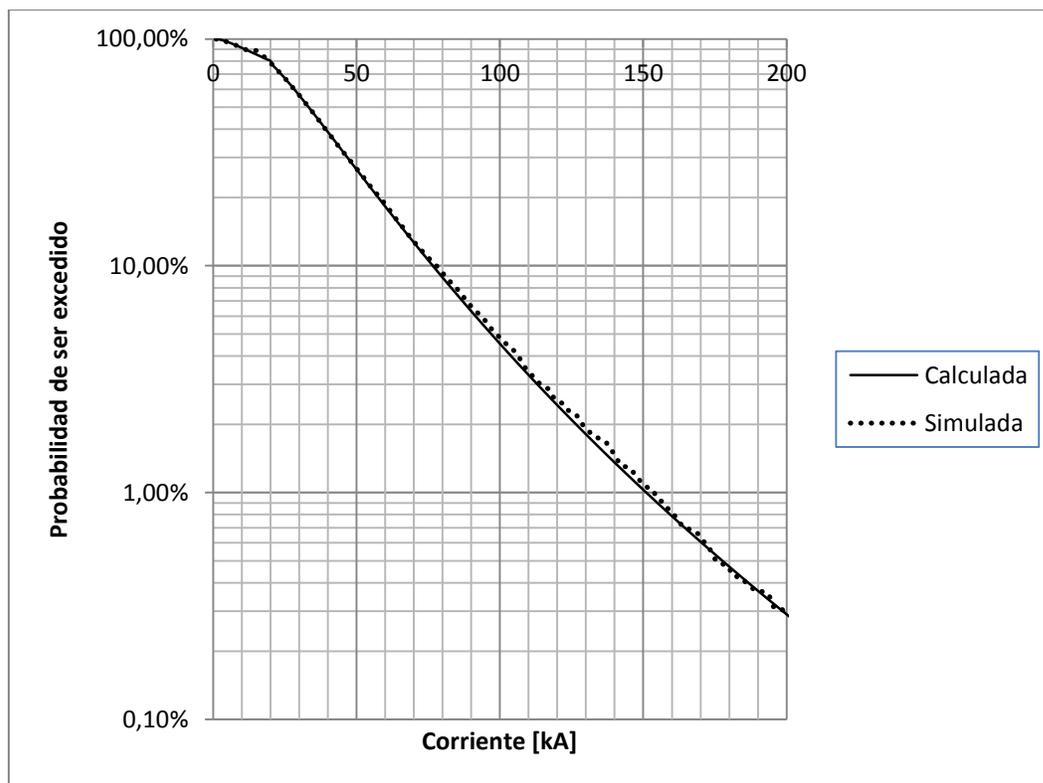
4.1.1.1 Planteamiento

Con el fin de validar la programación de la distribución de probabilidad con base en la cual se están generando las descargas se creó un total de diez mil descargas aleatorias y se obtuvo la distribución de probabilidad de las mismas.

4.1.1.2 Resultados

Los resultados de la distribución de probabilidad de las descargas generadas se pueden observar en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Distribución de probabilidad compuesta para la amplitud de la corriente calculada y simulada.



En la Figura 4-1 se presenta la distribución de probabilidad compuesta para la amplitud de la corriente calculada mediante la función de distribución log normal del Excel [55]

comparada con la distribución de probabilidad compuesta para la amplitud de la corriente simulada mediante la herramienta OTL. De dicha figura se puede observar que se están reproduciendo adecuadamente las distribuciones de probabilidad seleccionadas para las descargas en la metodología de optimización planteada, presentándose un error absoluto máximo del 3,31% entre las distribuciones de probabilidad calculada y simulada.

4.1.2 Caso 2: Densidad de descargas

4.1.2.1 Planteamiento

Se realizó un caso con el fin validar que se reproduzca adecuadamente la densidad de descargas a tierra de entrada mediante la densidad de descargas a tierra simulada para cada vano, esto según el número de años de simulación. Para esta validación se utilizó una línea con diez vanos con un nivel cerámico de 40 días tormentosos / año en los nueve primeros y 200 días tormentosos / año en el último, para 1, 10, 100, 1000 y 10.000 años.

4.1.2.2 Resultados

Los resultados obtenidos en la validación se muestran en la Tabla 4-1. En dicha tabla se presenta inicialmente la densidad de descargas a tierra de entrada y calculada para cada vano y año, y posteriormente se presenta el error relativo obtenido para cada densidad de descargas a tierra calculada respecto de su correspondiente valor de entrada.

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 4-1 se puede observar que con 10.000 años de simulación en adelante se obtienen errores relativos menores al 2% en los valores de densidad de descargas a tierra calculados respecto a los de entrada para todas las densidades de descargas simuladas.

Para densidades de descarga pequeñas se requiere un número mayor de años de simulación a fin de reproducir las densidades de descargas a tierra de entrada respecto a los años requeridos por densidades de descargas altas, esto debido precisamente al número de descargas que representan. En cada uno de los casos a estudiar se debe evaluar la cantidad de años a simular a fin de que se replique adecuadamente las densidades de descargas a tierra de entrada en las calculadas.

Tabla 4-1: Resultados de la validación de densidad de descargas.

Densidad de descargas a tierra [Descargas/km²*año]						
Vano	Años	1	10	100	1000	10.000
	De entrada	Calculada				
1	0,53661	0,66489	0,66489	0,47872	0,52726	0,53551
2	0,53661	0,00000	0,35000	0,55000	0,54700	0,54250
3	0,53661	0,59666	0,47733	0,56683	0,54296	0,53604
4	0,53661	0,83612	0,41806	0,40970	0,53846	0,53604
5	0,53661	0,00000	0,43478	0,60326	0,53261	0,53326
6	0,53661	0,51975	0,77963	0,50416	0,49324	0,54033
7	0,53661	1,21065	0,54479	0,47215	0,53027	0,54861
8	0,53661	0,50403	0,40323	0,69052	0,53276	0,53317
9	0,53661	1,01833	0,45825	0,60081	0,56110	0,54231
10	6,60778	6,60066	7,26073	6,4769	6,68069	6,61452
Error relativo [%]						
1	0,00	23,91	23,91	10,79	1,74	0,20
2	0,00	100,00	34,78	2,50	1,94	1,10
3	0,00	11,19	11,05	5,63	1,18	0,11
4	0,00	55,82	22,09	23,65	0,34	0,11
5	0,00	100,00	18,98	12,42	0,75	0,62
6	0,00	3,14	45,29	6,05	8,08	0,69
7	0,00	125,61	1,52	12,01	1,18	2,24
8	0,00	6,07	24,86	28,68	0,72	0,64
9	0,00	89,77	14,60	11,96	4,56	1,06
10	0,00	0,11	9,88	1,98	1,10	0,10
Error máximo		125,61	45,29	28,68	8,08	2,24

Comparando los resultados para las densidades de descargas a tierra simuladas de los nueve primeros vanos con respecto al décimo se puede observar que la diferenciación de la cantidad de descargas por vanos se está representando adecuadamente.

4.2 Validación del cálculo de impactos

Se realizaron dos casos con el fin de validar el cálculo de impactos de la metodología de optimización basado en el método electrogeométrico, que fue planteado en el numeral 2.2 de este trabajo. Dicha validación, se realiza con respecto a los cálculos de un algoritmo para hallar la cantidad de descargas eléctricas que impactan el cable de guarda y el conductor de fase de una línea de transmisión basado en el mismo método, este último algoritmo fue elaborado en el programa MATLAB basado en la referencia [4]. El planteamiento y los resultados de dichos casos se presentan a continuación.

4.2.1 Caso 1: Ejemplo 1 de la página 264 de la referencia [4]

4.2.1.1 Planteamiento

Se plantea una línea de transmisión con un circuito y dos cables de guarda, con un ángulo de apantallamiento de 25° y la configuración de la estructura que se muestra en la Figura 4-2. En este caso se considera una densidad de descargas a tierra de 4 descargas/km²*año.

Figura 4-2: Configuración de la estructura de la validación del cálculo de impactos – Caso 1.

Estructura								
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	
1	1	0	1.0335	0.122	-3.72	26	26	
2	2	0	1.0335	0.122	0	26	26	
3	3	0	1.0335	0.122	3.72	26	26	
4	4	0	0.489	1.4627	-1.86	30	30	
5	5	0	0.489	1.4627	1.86	30	30	
▶▶								

4.2.1.2 Resultados

Los resultados obtenidos en la validación se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Resultados de la validación del cálculo de impactos – Caso 1.

Tasa de fallas de apantallamiento [Descargas/año]		Error relativo [%]
MATLAB	Herramienta OTL	
0,287	0,245	14,63

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 4-1 se puede observar que se obtienen valores similares respecto al número de impactos en las fases por ambas metodologías, con un error relativo del 14,63%. Este error es debido principalmente a que en la metodología de optimización propuesta las descargas se generan con base en el método Monte Carlo, mientras que en la metodología de la referencia [4] se parte de un número determinado de descargas con base en la distribución de probabilidad de corriente.

4.2.2 Caso 2: Ejemplo 2 de la página 265 de la referencia [4]

4.2.2.1 Planteamiento

Se plantea una línea de transmisión con un circuito y dos cables de guarda, con un ángulo de apantallamiento de 35° y la configuración de la estructura que se muestra en la Figura 4-3. En este caso se considera una densidad de descargas a tierra de 4 descargas/km²*año.

Figura 4-3: Configuración de la estructura de la validación del cálculo de impactos – Caso 2.

Estructura								
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	
1	1	0	1.0335	0.122	-5.6016	26	26	
2	2	0	1.0335	0.122	0	26	26	
3	3	0	1.0335	0.122	5.6016	26	26	
4	4	0	0.489	1.4627	-2.8008	30	30	
5	5	0	0.489	1.4627	2.8008	30	30	
**								

4.2.2.2 Resultados

Los resultados obtenidos en la validación se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Resultados de la validación del cálculo de impactos – Caso 2.

Tasa de fallas de apantallamiento [Descargas/año]		Error relativo [%]
MATLAB	Herramienta OTL	
0,972146	0,95	2,28

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 4-3 se puede observar que se obtienen resultados similares respecto al número de impactos en las fases por ambas metodologías, con un error relativo del 2,28%. Este error es debido principalmente a que en la metodología de optimización propuesta las descargas se generan con base en el método Monte Carlo, mientras que en la metodología de la referencia [4] se parte de un número determinado de descargas con base en la distribución de probabilidad de corriente.

4.3 Validación del cálculo del número de fallas

Se realizó un caso con el fin de validar el cálculo del número de fallas implementado en la metodología de optimización, que fue planteado en el numeral 2 de este trabajo. Dicha validación, se realiza con respecto al cálculo del número de fallas del T-FLASH - EPRI [7], [19] y del FLASH –IEEE [22], [23]. El planteamiento y los resultados de dicho caso se presentan a continuación.

4.3.1 Caso 1:

4.3.1.1 Planteamiento

Se plantea una línea de transmisión con un circuito y un cable de guarda, con un haz de cuatro conductores por fase y la configuración de la estructura que se muestra en la Figura 4-4. En este caso se considera una densidad de descargas variable con el fin de configurar cuatro casos de simulación.

Figura 4-4: Configuración de la estructura de la validación del cálculo de fallas – Caso 1.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	1.0335	0.122	5	41.9	41.9	40	45	4
2	2	0	1.0335	0.122	-5	37.5	37.5	40	45	4
3	3	0	1.0335	0.122	5	33.1	33.1	40	45	4
4	4	0	0.489	1.4627	0	50	50	0	0	0
>>										

4.3.1.2 Resultados

Los resultados obtenidos en la validación se muestran en la Tabla 4-4. En dicha tabla se presenta inicialmente el número de fallas calculadas debidas a apantallamiento, flameo inverso y totales obtenidas mediante las metodologías de OTL, T-FLASH y FLASH, esto para cuatro simulaciones diferentes en las que se varia la densidad de descargas a tierra. Posteriormente en la misma tabla, se presenta el error relativo obtenido para el valor de fallas del OTL respecto de su correspondiente valor de T-FLASH y FLASH.

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 4-4 se puede observar que se obtienen valores similares en el número fallas de los resultados de la metodología de optimización respecto a los resultados de la metodología del T-FLASH para todos los

casos de simulación. El error relativo presente entre los resultados de las metodologías mencionadas es debido principalmente a que en la metodología de optimización propuesta se simulan las tensiones de forma detallada, mientras que en la metodología del T-FLASH se utilizan expresiones analíticas aproximadas para realizar el mismo cálculo.

Comparando los valores del número de fallas calculadas mediante la metodología del FLASH con los valores de la metodología de optimización y el T-FLASH se pueden observar diferencias que superan el 250% del error relativo, principalmente en las fallas debidas a flameo inverso. Este error es debido principalmente a que en la metodología el FLASH se usan aproximaciones determinísticas para el cálculo de las descargas mientras que en la metodología de optimización y en el T-FLASH se usan aproximaciones estocásticas para realizar el mismo cálculo.

Tabla 4-4: Resultados de la validación del cálculo de fallas – Caso 1.

Simulación	Densidad de descargas a tierra [Descargas /km ² *Año]	Metodología	Fallas calculadas [Falla/100 km/año]		
			Apantallamiento	Flameo inverso	Totales
1	0,76005	OTL	0,30	0,52	0,82
		T-FLASH	0,33	0,52	0,85
		FLASH	0,00	0,00	0,00
		Error T-FLASH	10,00	0,00	3,66
		Error FLASH	100,00	100,00	100,00
2	2,24104	OTL	0,86	2,00	2,86
		T-FLASH	0,97	1,55	2,52
		FLASH	0,62	5,74	6,36
		Error T-FLASH	12,79	22,50	11,89
		Error FLASH	36,08	270,32	152,38
3	4,21104	OTL	2,10	3,40	5,50
		T-FLASH	1,83	3,02	4,85
		FLASH	1,23	11,47	12,70
		Error T-FLASH	12,86	11,18	11,82
		Error FLASH	32,79	279,80	161,86
4	6,60778	OTL	2,18	5,44	7,62
		T-FLASH	2,86	7,82	10,68
		FLASH	1,85	17,21	19,06
		Error T-FLASH	31,19	43,75	40,16
		Error FLASH	35,31	120,08	78,46

4.4 Validación del método de optimización – Método de Nelder-Mead modificado

Se realizó un caso con el fin de validar el método de optimización de Nelder-Mead modificado implementado en la metodología de optimización, que fue planteado en el numeral 3.3 de este trabajo. El planteamiento y los resultados de dicho caso se presentan a continuación.

4.4.1 Caso 1:

4.4.1.1 Planteamiento

Se plantea una línea de transmisión de 220 kV conformada por un circuito, un cable de guarda y tres estructuras. La configuración de este caso en la herramienta de cálculo OTL se presenta en la Figura 4-5.

Figura 4-5: Configuración en la herramienta OTL – Caso 1.

Datos generales

Nivel cerámico del sitio (Td): Nivel cerámico del sitio (Td) #Ph: 4

Densidad de descargas a tierra (Ng): Densidad de descargas a tierra (Ng) Auto bundling

Años a simular: 1000 Años

Tensión del sistema: 220 kVrms L-L

Número de fallas

de fallas permitidas por apartamiento: 0 Fallas/100 km/Año

de fallas permitidas por flaneo inverso: 2.3 Fallas/100 km/Año

de fallas totales permitidas: 2.3 Fallas/100 km/Año

Factor de seguridad: 0 %

Límites de diseño predeterminados

Longitud de arco seco de la cadena de aisladores: Valor mínimo 2.628 m Máximo 2.92 m

Resistencia de puesta a tierra de la torre: Valor mínimo 16 Ohm Máximo 20 Ohm

Datos económicos y de convergencia

Valor de 2 Ohm menos: 100000 \$

Valor de un aislador: 100000 \$

Precisión de convergencia deseada: 1 %

Estructura

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	1.0335	0.122	5	36.9	36.9	40	45	4
2	2	0	1.0335	0.122	-5	32.5	32.5	40	45	4
3	3	0	1.0335	0.122	5	28.1	28.1	40	45	4
4	4	0	0.489	1.4627	0	45	45	0	0	0

Topología de la línea

# Torre	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Altura de pata [m]	Resistividad del suelo [ohm·m]	Longitud de arco seco de la cadena de aisladores [m]	Resistencia de puesta a tierra de la torre [Ohm]	Longitud de arco seco mínima [m]	Longitud de arco seco máxima [m]	Resistencia de puesta a tierra mínima [Ohm]	Resistencia de puesta a tierra máxima [Ohm]
1	1	1	0	5	600	2.628	16	2.628	2.92	16	20
2	1.376	1.328	0	5	600	2.628	16	2.628	2.92	16	20
3	1.876	1.328	0	5	600	2.628	16	2.628	2.92	16	20

Cálculo de descargas

# Vano	Rho [ohm·m]	Longitud [km]	Td [Días tormentosos / Año]	Ng calculada de entrada [Descargas / km ² x Año]	Ng calculada de simulación [Descargas / km ² x Año]
1	600	0.5	100	2.24104	
2	600	0.5	120	2.97832	

Botones de acción: Calcular Ng de entrada, Monte Carlo, Calcular Ng de simulación, Optimizar búsqueda completa, Llenar límites de diseño, Optimizar búsqueda directa, Conteo de descargas

En la Figura 4-5 es de resaltar la cantidad de valores que puede tomar la longitud de arco seco por estructura $U_{ipos} = 3$, la cantidad de valores que puede tomar la resistencia de puesta a tierra por estructura $R_{ipos} = 3$ y que el costo de un paso más de la longitud de arco seco $G(U)$ es igual al costo de un paso menos de la resistencia de puesta a tierra $G(R)$.

4.4.1.2 Resultados

Inicialmente, se realizó una búsqueda completa de la solución simulando cada uno de los 729 casos que conforman el espacio de búsqueda, este número de casos fue obtenido reemplazando en la Ecuación (3.10) $U_{ipos} = 3$ y $R_{ipos} = 3$, teniendo en cuenta además las tres estructuras que conforman la línea de transmisión. Los resultados de esta simulación se presentan a continuación.

Se encontraron los resultados de la mejor condición conformada por el valor máximo de la longitud de arco seco U_{imax} y el valor mínimo de la resistencia de puesta a tierra R_{imin} , y la peor condición conformada por el valor mínimo de la longitud de arco seco U_{imin} y el valor máximo de la resistencia de puesta a tierra R_{imax} en todas las estructuras de la línea con el fin observar el número de fallas totales calculadas N_{Tcal} que se puede obtener. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Resultados de la mejor condición y la peor condición en todas las estructuras.

Condición de la línea	Número de fallas totales calculadas
	[fallas/(100 km-año)]
Mejor condición	2,00
Peor condición	3,00

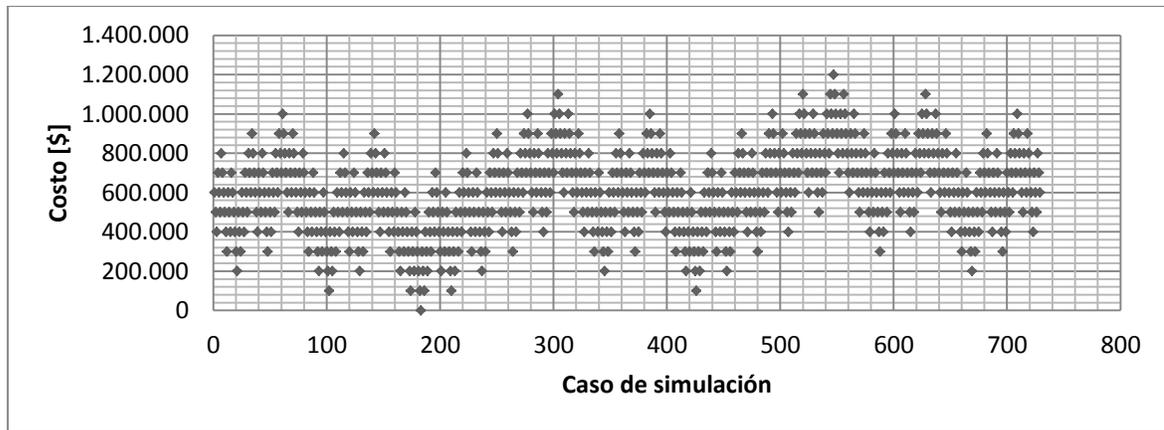
Se encontró que el promedio del número de fallas totales calculadas N_{Tcal} dentro de los valores presentados en la Tabla 4-5 fue de $2,3 \text{ Fallas}/100 \text{ km}/\text{Año}$, por lo que se estableció este valor como el número de fallas totales permitidas N_{Tper} para realizar la optimización. Con el valor de $2,3 \text{ Fallas}/100 \text{ km}/\text{Año}$ se tiene que en la simulación 429 se encuentra el óptimo con los parámetros de la línea que se presentan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda completa – Caso 1.

Estructura	Longitud de arco seco	Resistencia de puesta a tierra
#	[m]	[Ω]
1	2,774	20
2	2,628	20
3	2,774	20
Costo	\$200.000	

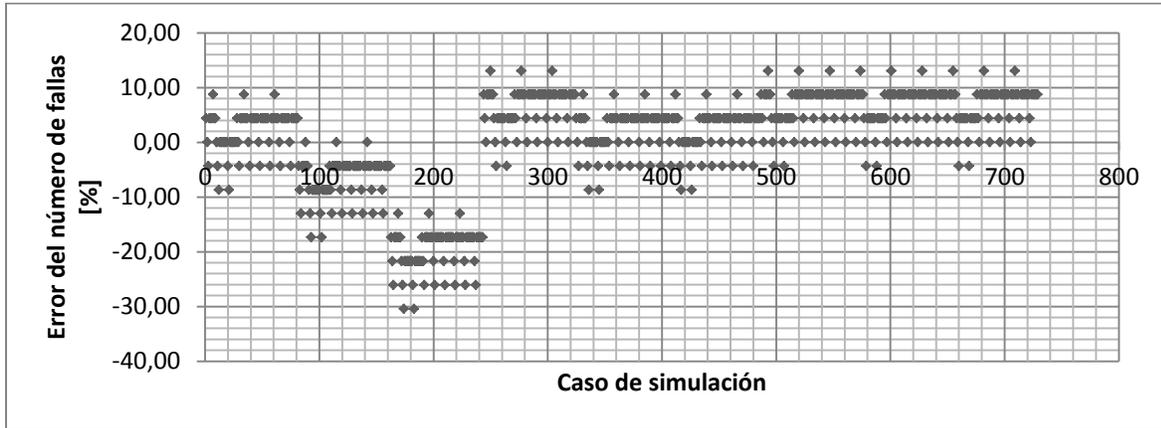
En la Figura 4-6 se presenta el costo de los 729 casos de simulación obtenido por medio de la búsqueda completa. En esta figura se puede observar que existen varios casos con el valor del costo de la solución óptima \$200.000 o incluso menores. Estos últimos casos no cumplen con la condición del número de fallas requerido.

Figura 4-6: Costo para cada caso.



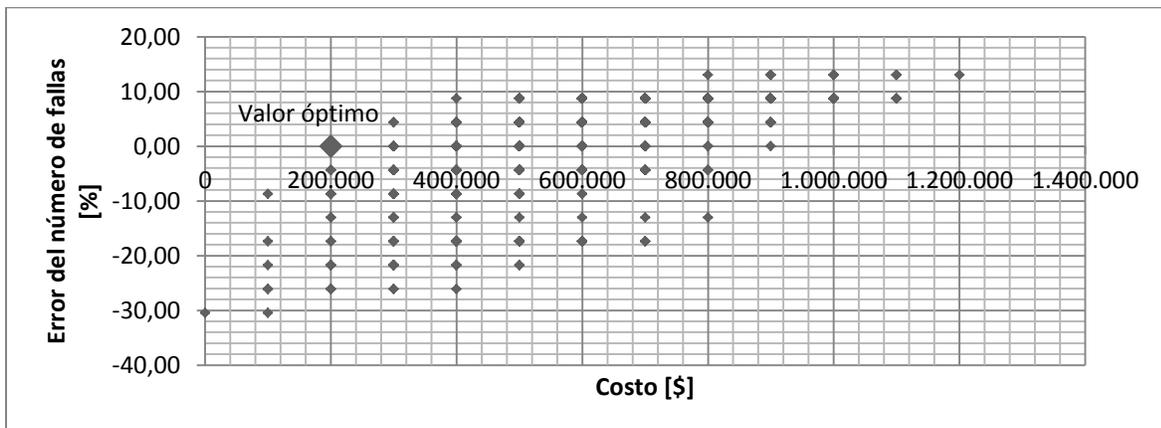
En la Figura 4-7 se presenta el porcentaje de error relativo del número de fallas totales calculadas respecto a las permitidas. En esta figura se puede observar que existen varios casos donde el número de fallas totales calculadas N_{Tcal} es igual al número de fallas totales permitidas N_{Tper} , lo cual equivale a un error relativo del 0%. Estos últimos casos no cumplen con el valor del costo de la solución óptima.

Figura 4-7: Error relativo del número de fallas totales calculadas respecto a las permitidas.



En la Figura 4-8 se presentan los valores de costo contra el error relativo del número de fallas calculadas respecto a las permitidas para los 729 casos. En esta grafica se puede observar resaltado el valor óptimo que cumple error relativo del 0% y el mínimo costo de \$200.000.

Figura 4-8: Error del número de fallas respecto al costo.



Posteriormente, se realizó la búsqueda directa por medio del método de optimización de Nelder-Mead modificado implementado en la metodología de optimización, los resultados de esta simulación se presentan a continuación.

Por medio del método de optimización de Nelder-Mead se encontró el mismo valor óptimo hallado por medio de la búsqueda completa que se puede observar en la Tabla 4-6. Para llegar a este resultado se realizó el número de operaciones y simulaciones del método de optimización de Nelder-Mead modificado que se muestra en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Número de operaciones y simulaciones del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.

Operación del método de optimización	Cantidad
Evaluación de límites	2
Simplex inicial	7
Reflexión	10
Expansión	0
Contracción	7
Encogimiento	5
Total de simulaciones	56

Con base en los resultados anteriores se puede estimar la reducción en el costo computacional como se muestra en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Reducción del costo computacional del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.

Método	Número de simulaciones	Costo computacional
Búsqueda completa	729	100,00%
Método de optimización	56	7,68%
Diferencia	673	92,32%

En la Tabla 4-8 se puede observar que la reducción en el costo computacional del método de optimización de Nelder-Mead modificado respecto a la búsqueda completa es de un 92,18%, es decir que requiere del 7,68% del proceso de búsqueda equivalente a 56 casos para encontrar la solución óptima.

Por otra parte, se puede estimar la reducción en el costo económico de la solución optimizada comparándola con la mejor solución. Los resultados de esta estimación se presentan en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Reducción en el costo económico del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.

Solución	Costo [\$]	Costo de la solución
Mejor	1.200.000	100,00%
Optimizada	200.000	16,67%
Diferencia	1.000.000	83,33%

En la Tabla 4-9 se puede observar que la reducción del costo económico del método de optimización de Nelder-Mead modificado respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 83,33%, es decir que se requiere del 16,67% del costo de instalación equivalente a \$200.000 con la solución óptima.

4.5 Validación del método de optimización – Método heurístico

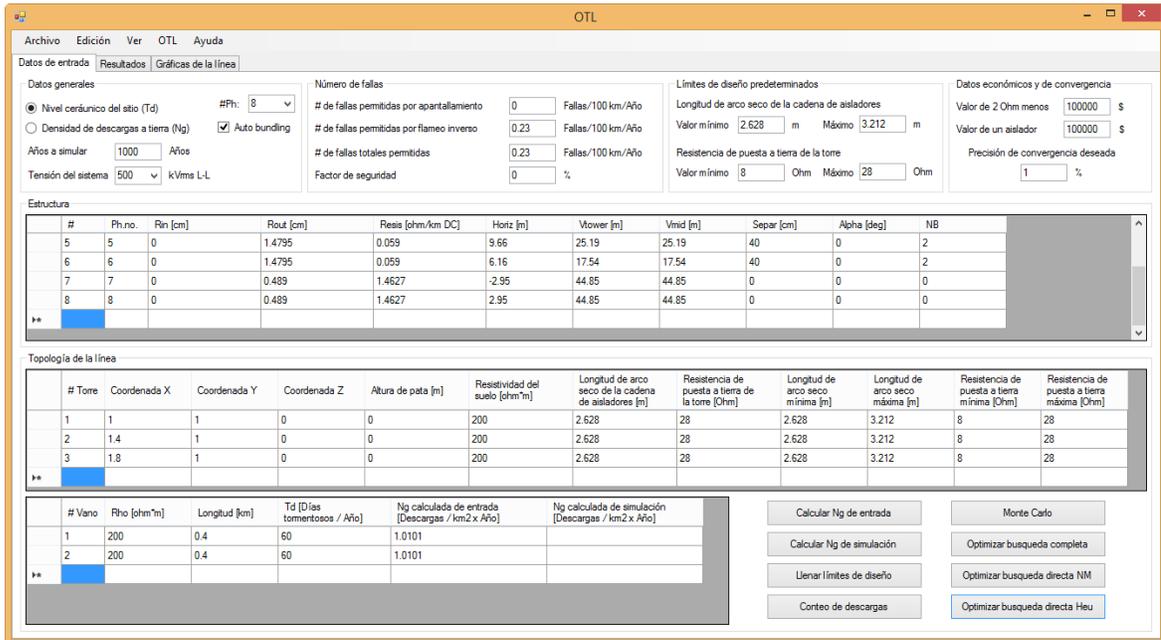
Se realizaron dos casos con el fin de validar el método de optimización heurístico implementado en la metodología de optimización, que fue planteado en el numeral 3.4 de este trabajo. Dicha validación, se realiza respecto a los resultados generados por medio de la metodología de optimización de la referencia [21]. El planteamiento y los resultados de dichos casos se presentan a continuación.

4.5.1 Caso 1:

4.5.1.1 Planteamiento

Se plantea una línea de transmisión de 400 kV conformada por dos circuitos, dos cables de guarda y tres estructuras. La configuración de este caso en la herramienta de cálculo OTL se presenta en la Figura 4-9.

Figura 4-9: Configuración de la herramienta OTL - Caso 1.



En la Figura 4-9 es de resaltar que el número de fallas totales permitidas N_{Tper} fue configurado en 0,23 Fallas/100 km/Año según lo requerido en la referencia [21] y que el nivel cerámico T_d fue configurado en un valor diferente al de la referencia [21] a fin de ajustar el número de fallas calculadas. Esto se realizó debido a que en la referencia [21] se realiza el cálculo de fallas mediante ecuaciones analíticas aproximadas y algunos de los datos requeridos para el cálculo de la presente metodología de optimización no se presentan en el artículo.

4.5.1.2 Resultados

Se realizó la búsqueda directa por medio del método de optimización heurístico propuesto en este trabajo. Los resultados de esta simulación se presentan en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 1.

Estructura	Longitud de arco seco	Resistencia de puesta a tierra
#	[m]	[Ω]
1	3,212	8
2	3,212	8
3	3,212	16
Costo	\$3'800.000	

En la Tabla 4-11 se presentan las soluciones óptimas obtenidas por medio de la metodología de optimización propuesta y la metodología de optimización de la referencia [21].

Tabla 4-11: Valor óptimo encontrado por ambas metodologías – Caso 1.

Método	Longitud de arco seco		Resistencia de puesta a tierra		Número de fallas	
	[m]		[Ω]		[fallas/(100 km-año)]	
	Inicial	óptimo	Inicial	óptimo	Inicial	óptimo
Método de referencia	2,628	3,212	28,92	9,56	1,33	0,23
Método de optimización	2,628	3,212	28,00	8,00	1,38	0,13

En la Tabla 4-11 se puede observar que mediante ambas metodologías se obtienen cambios similares en los valores de longitud de arco seco y resistencia de puesta a tierra, con un cambio proporcional en la reducción del número de fallas. Para llegar a este resultado por medio de la metodología de optimización se realizó un total de 33 simulaciones.

Con base en los resultados anteriores se puede estimar la reducción en el costo computacional como se muestra en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12: Reducción del costo computacional del método de optimización heurístico – Caso 1.

Método	Número de simulaciones	Costo computacional
Búsqueda completa	166.375	100,00%
Método de optimización	33	0,02%
Diferencia	166.342	99,98%

En la Tabla 4-12 se puede observar que la reducción en el costo computacional del método de optimización heurístico propuesto respecto a la búsqueda completa es de un 99,98%, es decir que requiere del 0,02% del proceso de búsqueda equivalente a 33 casos para encontrar la solución óptima.

Por otra parte, se puede estimar la reducción en el costo económico de la solución optimizada comparándola con la mejor solución. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13: Reducción en el costo económico del método de optimización heurístico – Caso 1.

Solución	Costo [\$]	Costo de la solución
Mejor	4'200.000	100,00%
Optimizada	3'800.000	90,48%
Diferencia	400.000	9,52%

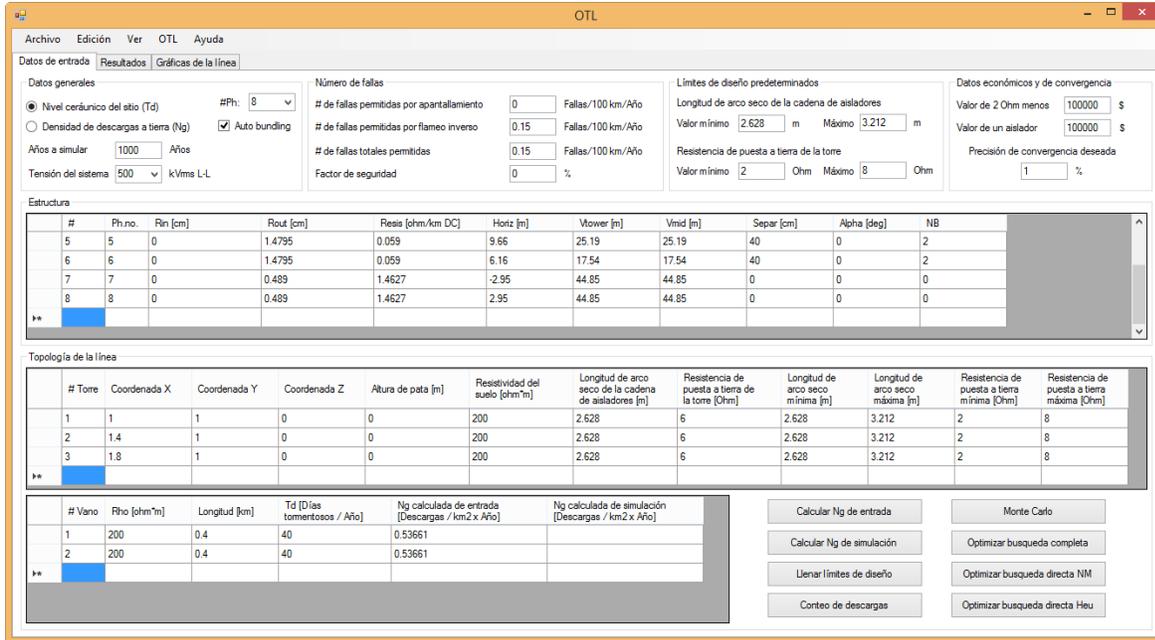
En la Tabla 4-9 se puede observar que la reducción del costo económico del método de optimización heurístico respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 9,52%, es decir que se requiere del 90,48% del costo de instalación equivalente a \$3'800.000 con la solución óptima.

4.5.2 Caso 2:

4.5.2.1 Planteamiento

Se plantea una línea de transmisión de 400 kV conformada por dos circuitos, dos cables de guarda y tres estructuras. La configuración de este caso en la herramienta de cálculo OTL se presenta en la Figura 4-10.

Figura 4-10: Configuración de la herramienta OTL - Caso 2.



En la Figura 4-10 es de resaltar que el número de fallas totales permitidas N_{Tper} fue configurado en 0,15 *Fallas/100 km/Año* según lo requerido en la referencia [21] y que el nivel cerámico T_d fue configurado en un valor diferente al de la referencia [21] a fin de ajustar el número de fallas calculadas. Esto se realizó debido a que en la referencia [21] se realiza el cálculo de fallas mediante ecuaciones analíticas aproximadas y algunos de los datos requeridos para el cálculo de la presente metodología de optimización no se presentan en el artículo.

4.5.2.2 Resultados

Se realizó la búsqueda directa por medio del método de optimización heurístico propuesto en este trabajo. Los resultados de esta simulación se presentan en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 2.

Estructura	Longitud de arco seco	Resistencia de puesta a tierra
#	[m]	[Ω]
1	3,066	2
2	3,066	2
3	2,92	6
Costo	\$1'500.000	

En la Tabla 4-15 se presentan las soluciones óptimas obtenidas por medio de la metodología de optimización propuesta y la metodología de optimización de la referencia [21].

Tabla 4-15: Valor óptimo encontrado por ambas metodologías – Caso 2.

Método	Longitud de arco seco		Resistencia de puesta a tierra		Número de fallas	
	[m]		[Ω]		[fallas/(100 km-año)]	
	Inicial	óptimo	Inicial	óptimo	Inicial	óptimo
Método de referencia	2,628	3,066	6,51	2,47	0,50	0,15
Método de optimización	2,628	3,066	8,00	2,00	0,5	0,13

En la Tabla 4-15 se puede observar que mediante ambas metodologías se obtienen cambios similares en los valores de longitud de arco seco y resistencia de puesta a tierra, con un cambio proporcional en la reducción del número de fallas. Para llegar a este resultado por medio de la metodología de optimización se realizó un total de 11 simulaciones.

Con base en los resultados anteriores se puede estimar la reducción en el costo computacional como se muestra en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16: Reducción del costo computacional del método de optimización heurístico – Caso 2.

Método	Número de simulaciones	Costo computacional
Búsqueda completa	8.000	100,00%
Método de optimización	11	0,14%
Diferencia	7.989	99,86%

En la Tabla 4-16 se puede observar que la reducción en el costo computacional del método de optimización heurístico propuesto respecto a la búsqueda completa es de un 99,86%, es decir que requiere del 0,14% del proceso de búsqueda equivalente a 11 casos para encontrar la solución óptima.

Por otra parte, se puede estimar la reducción en el costo económico de la solución optimizada comparándola con la mejor solución. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17: Reducción en el costo económico del método de optimización heurístico – Caso 2.

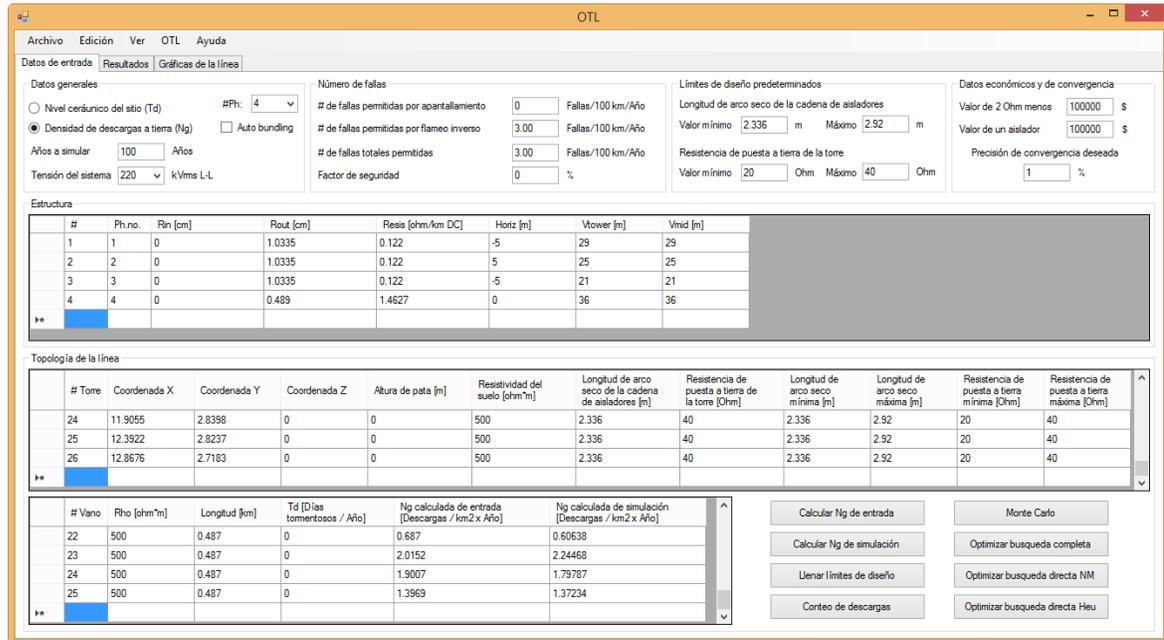
Solución	Costo [\$]	Costo de la solución
Mejor	2'100.000	100,00%
Optimizada	1'500.000	71,43%
Diferencia	600.000	28,57%

En la Tabla 4-17 se puede observar que la reducción del costo económico del método de optimización heurístico respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 28,57%, es decir que se requiere del 71,43% del costo de instalación equivalente a \$1'500.000 con la solución óptima.

4.6 Aplicación de la metodología de optimización propuesta

Se realizaron tres casos con el fin de aplicar la metodología de optimización que fue planteada en este trabajo. El planteamiento y los resultados de dichos casos se presentan a continuación.

Figura 4-13: Configuración de la herramienta OTL – Caso 1.



En la Figura 4-13 es de resaltar que el número de fallas totales permitidas N_{Tper} fue configurado en 3,00 Fallas/100 km/Año según lo requerido en la referencia [1], que el nivel cerámico T_d fue configurado en un valor proporcional al de la Figura 4-11 según lo recomendado por la referencia [1] a fin de obtener el número de fallas calculadas y que el costo de un paso más de la longitud de arco seco $G(U)$ es igual al costo de un paso menos de la resistencia de puesta a tierra $G(R)$.

4.6.1.2 Resultados

Se realizó la búsqueda directa por medio de los métodos de optimización de Nelder-Mead modificado y heurístico propuestos en este trabajo, los resultados de estas simulaciones se presentan a continuación. Se encuentra el óptimo con los parámetros de la línea que se presentan en la Tabla 4-18.

En la Tabla 4-18 se pueden observar los parámetros de longitud de arco seco – LAS y resistencia de puesta a tierra – RPT, acompañados del número de fallas, por cada una de las 26 estructuras de la línea de transmisión simulada. La información anterior se encuentra discriminada en la tabla para la condición inicial de los parámetros y los

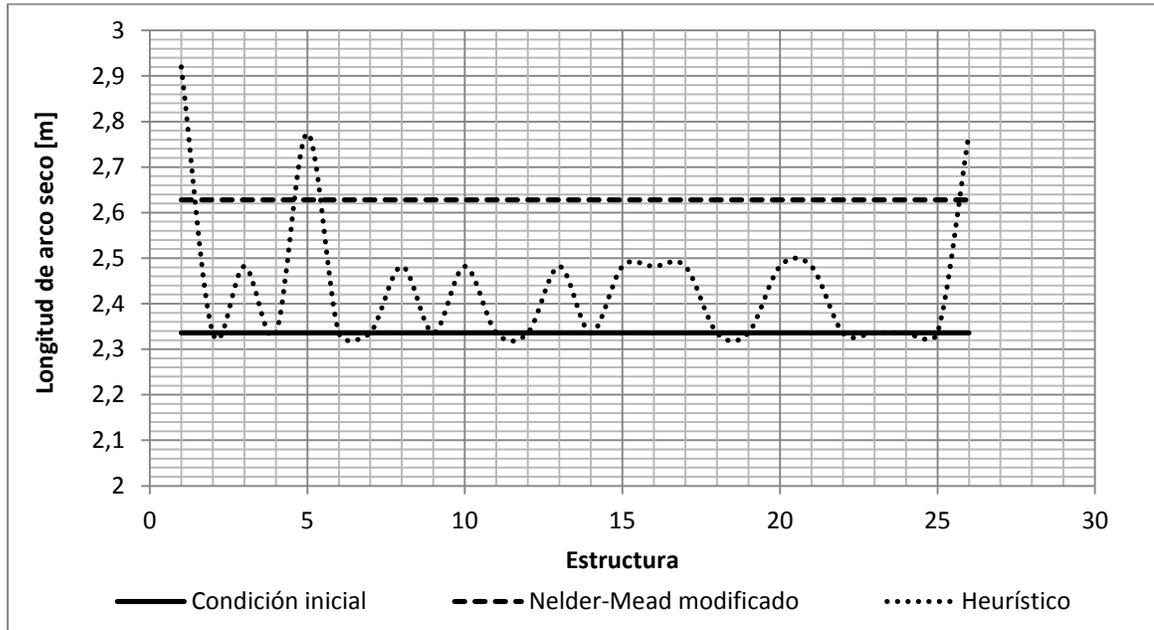
resultados obtenidos mediante los métodos de optimización de Nelder-Mead modificado y heurístico propuestos en este trabajo.

Tabla 4-18: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa de Nelder-Mead modificado y heurístico – Caso 1.

Método	Condición inicial			Nelder-Mead modificado			Heurístico			
	Estructura	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas
1		2,336	40	6	2,628	30	4	2,920	32	3
2		2,336	40	4	2,628	30	2	2,336	38	3
3		2,336	40	4	2,628	30	3	2,482	38	3
4		2,336	40	3	2,628	30	1	2,336	40	3
5		2,336	40	7	2,628	30	3	2,774	34	3
6		2,336	40	3	2,628	30	2	2,336	40	3
7		2,336	40	1	2,628	30	0	2,336	40	1
8		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
9		2,336	40	2	2,628	30	1	2,336	40	2
10		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
11		2,336	40	2	2,628	30	1	2,336	40	2
12		2,336	40	2	2,628	30	1	2,336	40	2
13		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
14		2,336	40	1	2,628	30	1	2,336	40	1
15		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
16		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
17		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
18		2,336	40	1	2,628	30	1	2,336	40	1
19		2,336	40	2	2,628	30	1	2,336	40	2
20		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
21		2,336	40	0	2,628	30	0	2,482	40	0
22		2,336	40	1	2,628	30	1	2,336	40	1
23		2,336	40	1	2,628	30	1	2,336	40	1
24		2,336	40	2	2,628	30	1	2,336	40	2
25		2,336	40	1	2,628	30	1	2,336	40	1
26		2,336	40	4	2,628	30	3	2,774	34	2

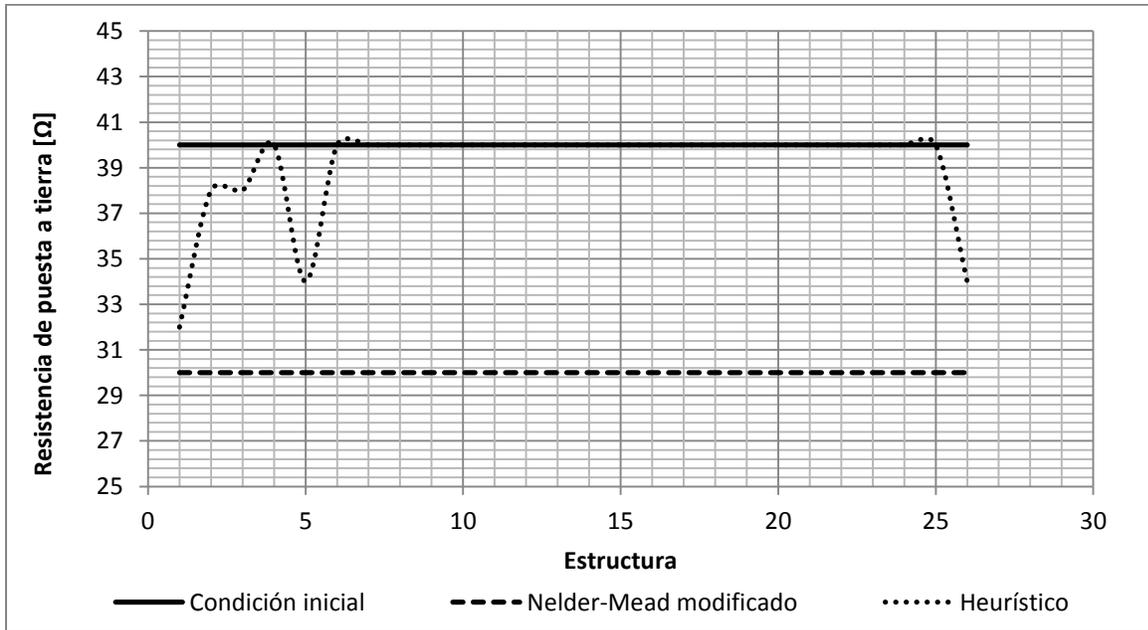
Con el fin de analizar adecuadamente los resultados presentados en la Tabla 4-18 se presentan la longitud de arco seco, la resistencia de puesta a tierra y el número de fallas de cada estructura en la Figura 4-14, la Figura 4-15 y la Figura 4-16, respectivamente.

Figura 4-14: Longitud de arco seco de cada estructura – Caso 1.



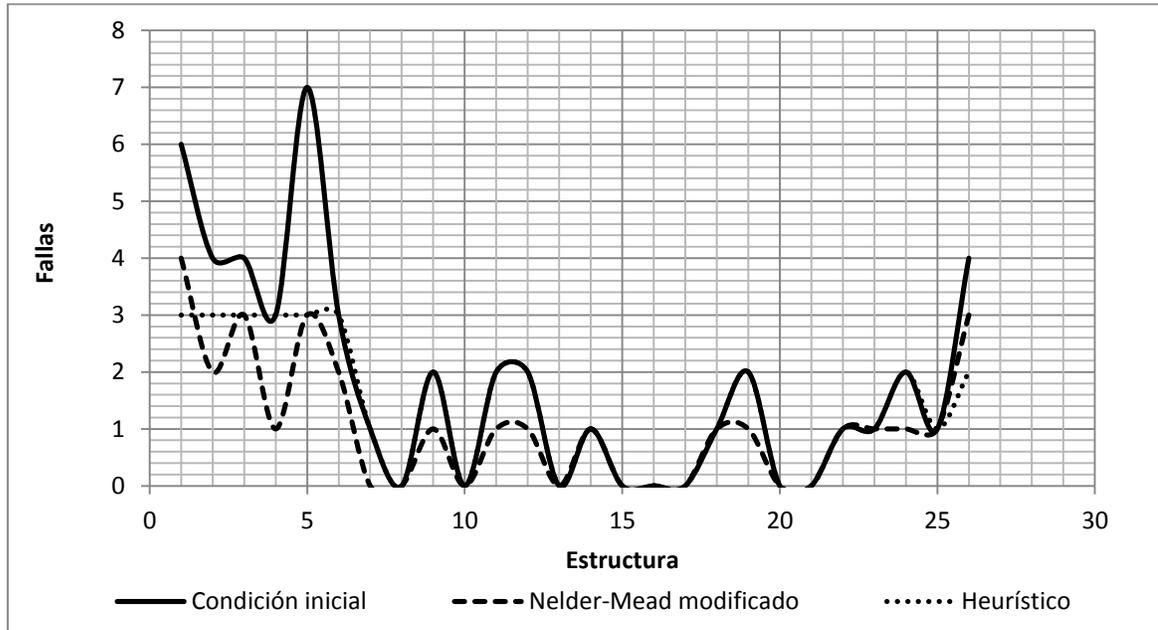
En la Figura 4-14 se puede observar que mediante el método de optimización de Nelder-Mead modificado se presenta una variación uniforme en la longitud de arco seco respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante el método de optimización heurístico se presenta una mayor variación de la longitud de arco seco en los extremos de la línea. La variación presentada en la longitud de arco seco mediante el método de optimización heurístico se aproxima de mejor manera a lo esperado en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que como se indicó en el planteamiento del caso en los extremos de la línea se tiene una mayor densidad de descargas y por tanto un número mayor de fallas.

Figura 4-15: Resistencia de puesta a tierra de cada estructura – Caso 1.



En la Figura 4-15 se puede observar que mediante el método de optimización de Nelder-Mead modificado se presenta una variación uniforme en la resistencia de puesta a tierra respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante el método de optimización heurístico se presenta una mayor variación de la resistencia de puesta a tierra en los extremos de la línea. La variación presentada en la resistencia de puesta a tierra mediante el método de optimización heurístico se aproxima de mejor manera a lo esperado en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que como se indicó en el planteamiento del caso en los extremos de la línea se tiene una mayor densidad de descargas y por tanto un número mayor de fallas.

Figura 4-16: Fallas de cada estructura – Caso 1.



En la Figura 4-16 se puede observar que las fallas de cada estructura presentadas en la condición inicial de la línea se asemejan al comportamiento de la distribución de descargas a tierra planteada, esto debido a que como se explicó en el planteamiento del caso en los extremos de la línea se tiene una mayor densidad de descargas y por tanto un número mayor de fallas. También de la figura se puede observar que mediante el método de optimización de Nelder-Mead modificado se presenta una reducción proporcional en el número de fallas de cada estructura respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante el método de optimización heurístico se presenta una reducción mayor de fallas de cada estructura en los extremos de la línea. La variación presentada en el número de fallas de cada estructura mediante el método de optimización heurístico se aproxima de mejor manera a lo esperado en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1.

En la Tabla 4-19 se presentan las soluciones óptimas obtenidas por medio de los métodos de optimización de Nelder-Mead modificado y heurístico propuestos en este trabajo.

Tabla 4-19: Valor óptimo encontrado por ambos métodos de optimización – Caso 1.

Método de optimización	Número de fallas por apantallamiento	Número de fallas por flameo inverso	Número de fallas totales
	[fallas/(100 km-año)]	[fallas/(100 km-año)]	[fallas/(100 km-año)]
Condición inicial	0,41	3,45	3,86
Nelder-Mead modificada	0,41	1,89	2,30
Heurística	0,41	2,55	2,96

Con base en la información de la Tabla 4-19 se puede observar que mediante ambos métodos de optimización se obtiene un número de fallas totales inferior al número de fallas totales permitidas 3,00 *Fallas/100 km/Año*, siendo más aproximado el resultado obtenido mediante el método de optimización heurístico con un error relativo del 1,33% en comparación con el valor obtenido mediante el método de optimización de Nelder-Mead modificado cuyo error relativo es del 23,33%.

Para llegar a este resultado se realizó el número de operaciones y simulaciones del método de optimización de Nelder-Mead modificado que se muestra en la Tabla 4-20. Por otra parte, para llegar a este resultado se realizó un total de 15 simulaciones del método de optimización heurístico.

Tabla 4-20: Número de operaciones y simulaciones del método de optimización de Nelder-Mead modificado – Caso 1.

Operación del método de optimización	Cantidad
Evaluación de límites	2
Simplex inicial	53
Reflexión	27
Expansión	0
Contracción	0
Encogimiento	0
Total de simulaciones	82

Con base en los resultados anteriores se puede estimar la reducción en el costo computacional como se muestra en la Tabla 4-21.

Tabla 4-21: Reducción del costo computacional de ambos métodos de optimización – Caso 1.

Método de optimización	Número de simulaciones	Costo computacional
Búsqueda completa	1,77 ⁴⁵	100,00%
Nelder-Mead modificada	82	0,00%
Diferencia	1,77 ⁴⁵	100,00%
Heurística	15	0,00%
Diferencia	1,77 ⁴⁵	100,00%

En la Tabla 4-21 se puede observar que la reducción en el costo computacional de ambos métodos de optimización propuestos respecto a la búsqueda completa es de aproximadamente un 100,00%, es decir que el proceso de búsqueda requerido para encontrar la solución óptima mediante ambas metodologías es despreciable comparado con el de la búsqueda completa. También, se puede observar de dicha tabla que el número de simulaciones requeridas para encontrar la solución óptima mediante el método de optimización heurístico es menor comparado con el método de optimización de Nelder-Mead modificado.

Por otra parte, se puede estimar la reducción en el costo económico de la solución optimizada comparándola con la mejor solución. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-22.

Tabla 4-22: Reducción en el costo económico de ambos métodos de optimización – Caso 1.

Método de optimización	Costo [\$]	Costo de la solución
Solución inicial	36'400.000	100,00%
Nelder-Mead modificada	18'200.000	50,00%
Diferencia	18'200.000	50,00%
Heurística	3'100.000	8,52%
Diferencia	33'300.000	91,48%

En la Tabla 4-22 se puede observar que la reducción del costo económico del método de optimización de Nelder-Mead modificado respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 50,00%, es decir que se requiere del 50,00% del costo de instalación equivalente a \$18'200.000 con la solución óptima. Por otra parte, en la misma tabla se

puede observar que la reducción del costo económico del método de optimización heurístico respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 91,48%, es decir que se requiere del 8,52% del costo de instalación equivalente a \$3'100.000 con la solución óptima.

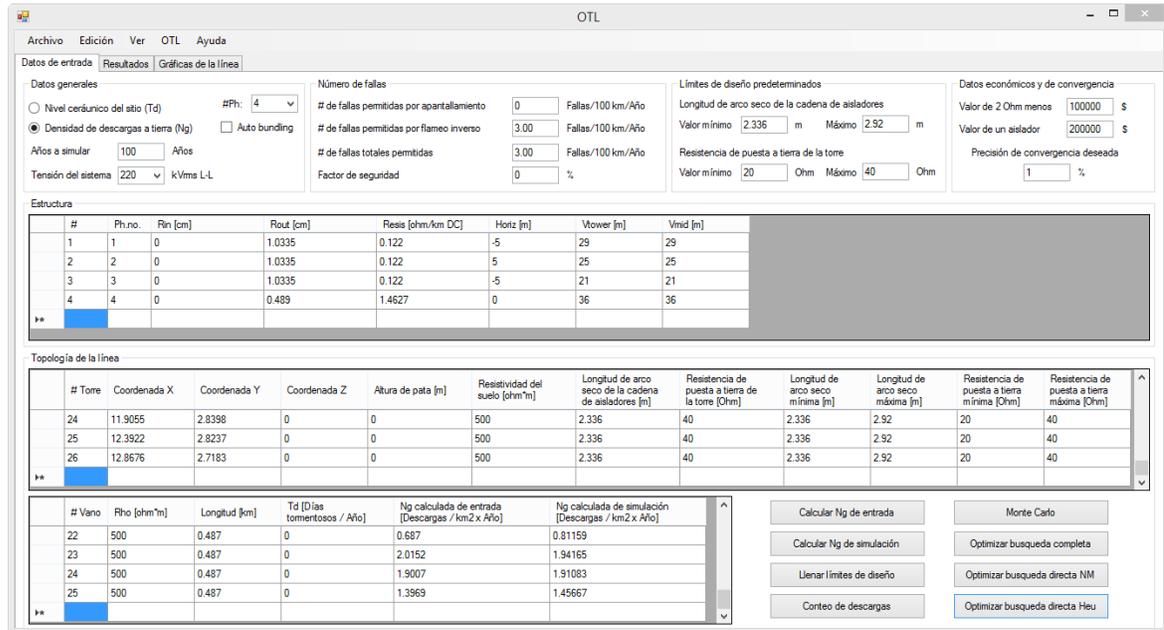
Finalmente, de los análisis realizados a los resultados de esta aplicación se puede resaltar que el método de optimización heurístico presenta soluciones óptimas más prácticas, según lo explicado en el numeral 3.4.1, en términos de la modificación de los parámetros de la línea y más económicas en términos de la reducción del costo computacional y económico. Esto en comparación con las soluciones obtenidas mediante el método de optimización de Nelder-Mead modificado y la solución inicial de la línea. Debido a lo anterior los siguientes casos de aplicación se enfocarán en el método de optimización heurístico. Por su parte, el método de optimización de Nelder-Mead modificado se podrá utilizar como respaldo o complemento del método de optimización heurístico cuando se requiera.

4.6.2 Caso 2:

4.6.2.1 Planteamiento

Se plantea la misma línea de transmisión de 230 kV conformada por un circuito y un cable de guarda del numeral 4.6.1.1 de este trabajo. En este caso en particular se modificará el costo de un paso más de la longitud de arco seco $G(U)$ con el fin de observar el comportamiento de la metodología de optimización propuesta. La configuración de este caso en la herramienta de cálculo OTL se presenta en la Figura 4-17.

Figura 4-17: Configuración de la herramienta OTL – Caso 2.



En la Figura 4-17 es de resaltar que el número de fallas totales permitidas N_{Tper} fue configurado en 3,00 *Fallas/100 km/Año* según lo requerido en la referencia [1], que el nivel cerámico T_d fue configurado en un valor proporcional al de la Figura 4-11 según lo recomendado por la referencia [1] a fin de obtener el número de fallas calculadas y que el costo de un paso más de la longitud de la torre $G(U)$ es el doble del costo de un paso menos de la resistencia de puesta a tierra $G(R)$.

4.6.2.2 Resultados

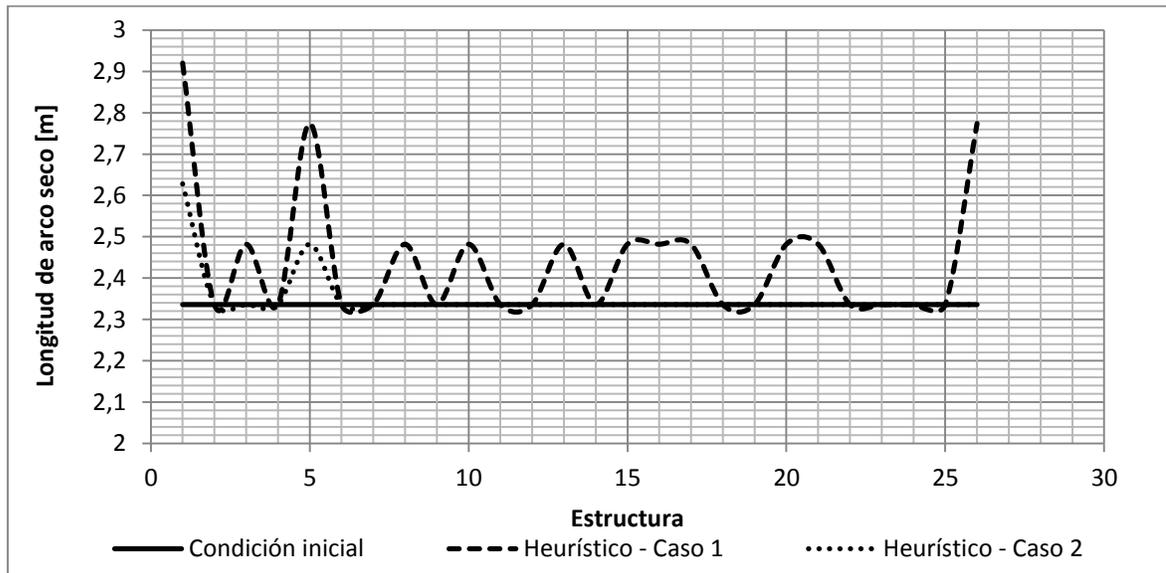
Se realizó la búsqueda directa por medio de la metodología de optimización propuesta en este trabajo, los resultados de esta simulación se presentan a continuación. Se encuentra el óptimo con los parámetros de la línea que se presentan en la Tabla 4-23.

En la Tabla 4-23 se pueden observar los parámetros de longitud de arco seco – LAS y resistencia de puesta a tierra – RPT, acompañados del número de fallas, por cada una de las 26 estructuras de la línea de transmisión simulada. La información anterior se encuentra discriminada en la tabla para la condición inicial de los parámetros y los resultados obtenidos mediante la metodología de optimización propuesta en este trabajo del Caso 1 y del Caso 2.

Tabla 4-23: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 2.

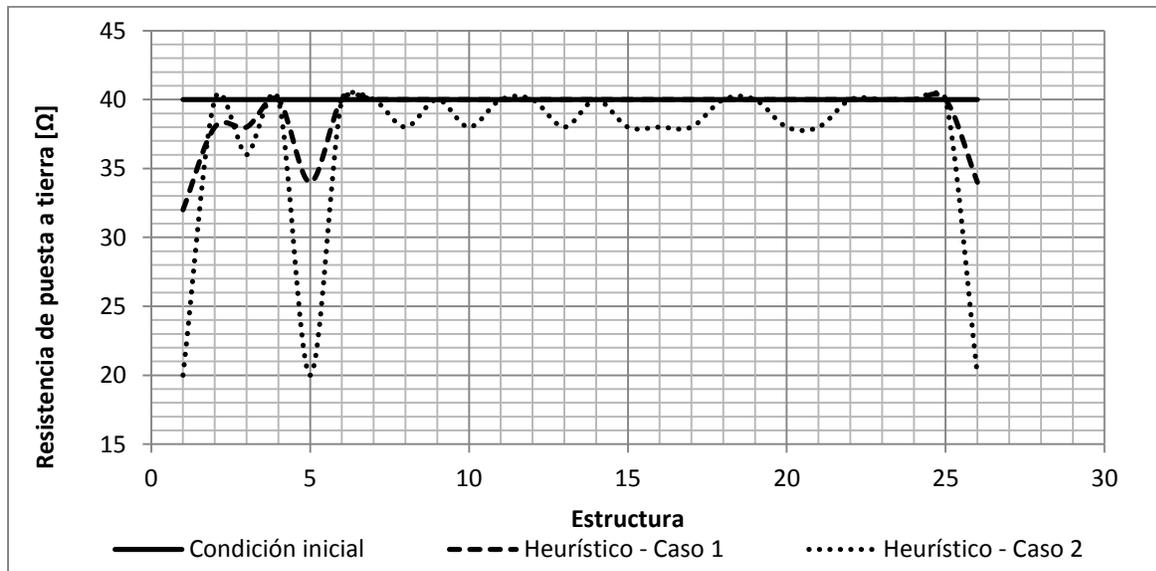
Método	Condición inicial			Heurístico - Caso 1			Heurístico - Caso 2		
	ESTRUCTURA	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]
1	2,336	40	6	2,920	32	3	2,628	20	3
2	2,336	40	4	2,336	38	3	2,336	40	3
3	2,336	40	4	2,482	38	3	2,336	36	3
4	2,336	40	3	2,336	40	3	2,336	40	2
5	2,336	40	7	2,774	34	3	2,482	20	3
6	2,336	40	3	2,336	40	3	2,336	40	3
7	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40	1
8	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
9	2,336	40	2	2,336	40	2	2,336	40	2
10	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
11	2,336	40	2	2,336	40	2	2,336	40	2
12	2,336	40	2	2,336	40	2	2,336	40	2
13	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
14	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40	1
15	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
16	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
17	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
18	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40	1
19	2,336	40	2	2,336	40	2	2,336	40	2
20	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
21	2,336	40	0	2,482	40	0	2,336	38	0
22	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40	1
23	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40	1
24	2,336	40	2	2,336	40	2	2,336	40	2
25	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40	1
26	2,336	40	4	2,774	34	2	2,336	20	2

Con el fin de analizar adecuadamente los resultados presentados en la Tabla 4-23 se presentan la longitud de arco seco, la resistencia de puesta a tierra y el número de fallas de cada estructura en la Figura 4-18, la Figura 4-19 y la Figura 4-20, respectivamente.

Figura 4-18: Longitud de arco seco de cada estructura – Caso 2.

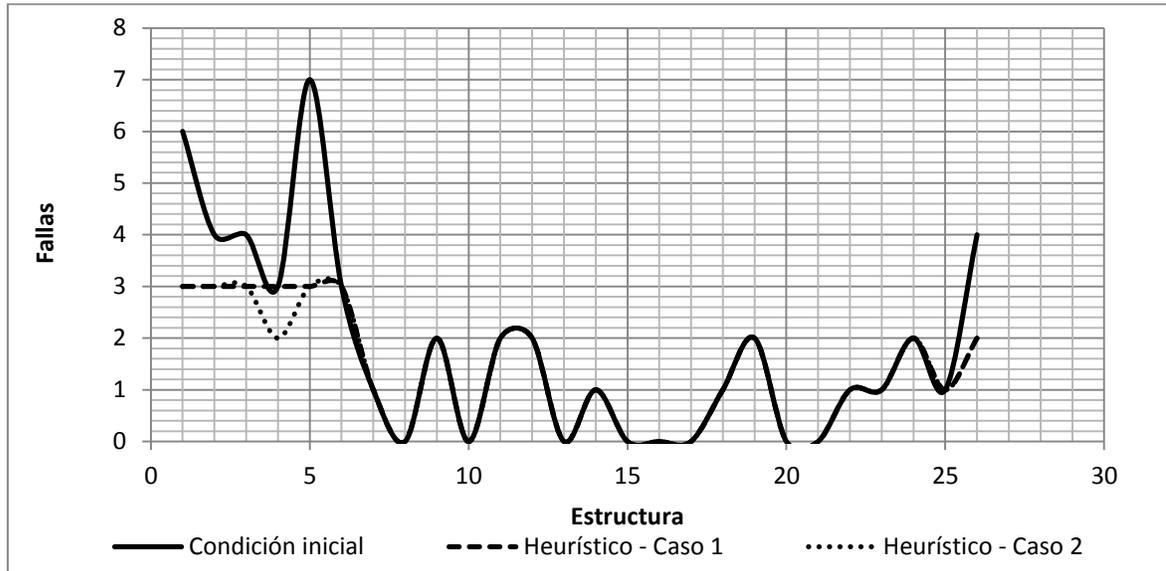
En la Figura 4-18 se puede observar que mediante la metodología de optimización aplicada al Caso 2 se presenta una variación menor en la longitud de arco seco respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante la misma metodología de optimización aplicada al Caso 1 se presenta una mayor variación de la longitud de arco seco. La variación presentada en la longitud de arco seco mediante el método de optimización heurístico del Caso 2 es la esperada en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que el costo de este parámetro es mayor en comparación con el costo de la resistencia de puesta a tierra, por lo que se espera que este el parámetro más económico tenga una mayor variación.

Figura 4-19: Resistencia de puesta a tierra de cada estructura – Caso 2.



En la Figura 4-19 se puede observar que mediante la metodología de optimización aplicada al Caso 2 se presenta una variación mayor en la resistencia de puesta a tierra respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante la misma metodología de optimización aplicada al Caso 1 se presenta una menor variación de la resistencia de puesta a tierra. La variación presentada en la resistencia de puesta a tierra mediante el método de optimización heurístico del Caso 2 es la esperada en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que el costo de este parámetro es menor en comparación con el costo de la longitud de arco seco, por lo que se espera que el parámetro más económico tenga una mayor variación.

Figura 4-20: Fallas de cada estructura – Caso 2.



En la Figura 4-20 se puede observar que mediante la metodología de optimización aplicada al Caso 2 se presenta un comportamiento similar en las fallas de cada estructura respecto a la misma metodología de optimización aplicada al Caso 1. El comportamiento anterior presentado en las fallas de cada estructura mediante el método de optimización heurístico del Caso 2 es el esperado en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que se le exigió el mismo número de fallas totales permitidas N_{Tper} que en el Caso 1, por lo que no se espera una variación significativa en el número de fallas totales calculadas N_{Tcal} .

En la Tabla 4-24 se presenta la solución óptima obtenida por medio de la metodología de optimización propuesta en este trabajo.

Tabla 4-24: Valor óptimo encontrado por la metodología de optimización – Caso 2.

Método	Número de fallas por apantallamiento	Número de fallas por flameo inverso	Número de fallas totales
	[fallas/(100 km-año)]	[fallas/(100 km-año)]	[fallas/(100 km-año)]
Condición inicial	0,41	3,45	3,86
Heurístico	0,41	2,46	2,88

Con base en la información de la Tabla 4-24 se puede observar que mediante la metodología de optimización se obtiene un número de fallas totales inferior al número de fallas totales permitidas $3,00 \text{ Fallas}/100 \text{ km}/\text{Año}$, lo anterior con un error relativo del 4,00%. Para llegar a este resultado por medio de la metodología de optimización se realizó un total de 23 simulaciones.

Con base en los resultados anteriores se puede estimar la reducción en el costo computacional como se muestra en la Tabla 4-25.

Tabla 4-25: Reducción del costo computacional de la metodología de optimización – Caso 2.

Método	Número de simulaciones	Costo computacional
Búsqueda completa	$1,77 \times 10^{45}$	100%
Heurístico	15	0,00%
Diferencia	$1,77 \times 10^{45}$	100%

En la Tabla 4-25 se puede observar que la reducción en el costo computacional de la metodología de optimización propuesta respecto a la búsqueda completa es de aproximadamente un 100,00%, es decir que el proceso de búsqueda requerido para encontrar la solución óptima mediante la metodología de optimización es despreciable comparado con el de la búsqueda completa.

Por otra parte, se puede estimar la reducción en el costo económico de la solución optimizada comparándola con la mejor solución. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-26.

Tabla 4-26: Reducción en el costo económico de la metodología de optimización – Caso 2.

Método	Costo [\$]	Costo de la solución
Solución inicial	36'400.000	100,00%
Heurístico	4'600.000	12,64%
Diferencia	31'800.000	87,36%

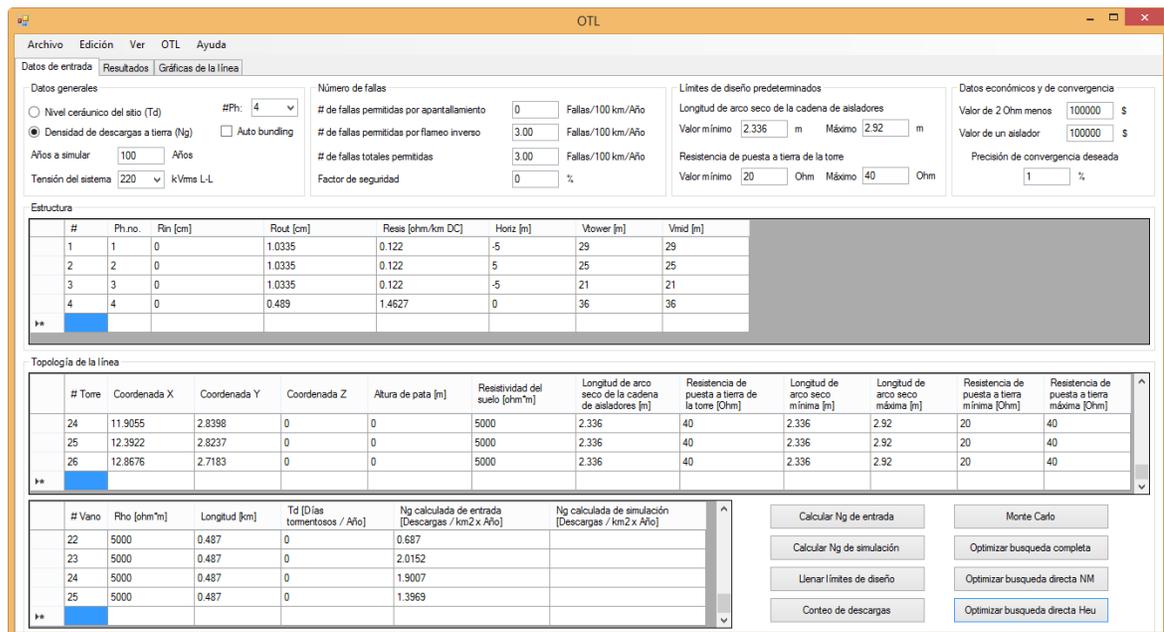
En la Tabla 4-26 se puede observar que la reducción del costo económico de la metodología de heurística respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 87,64%, es decir que se requiere del 12,64% del costo de instalación equivalente a \$4'600.000 con la solución óptima.

4.6.3 Caso 3:

4.6.3.1 Planteamiento

Se plantea la misma línea de transmisión de 230 kV conformada por un circuito y un cable de guarda del numeral 4.6.1.1 de este trabajo. En este caso en particular se modificará la resistividad del terreno con el fin de observar el comportamiento de la metodología de optimización propuesta. La configuración de este caso en la herramienta de cálculo OTL se presenta en la Figura 4-21.

Figura 4-21: Configuración de la herramienta OTL – Caso 3.



En la Figura 4-21 es de resaltar que el número de fallas totales permitidas N_{Tper} fue configurado en 3,00 *Fallas/100 km/Año* según lo requerido en la referencia [1], que el nivel cerámico T_d fue configurado en un valor proporcional al de la Figura 4-11 según lo recomendado por la referencia [1] a fin de obtener el número de fallas calculadas, que el costo de un paso más de la longitud de arco seco $G(U)$ es igual al costo de un paso

menos de la resistencia de puesta a tierra $G(R)$ y que la resistividad del terreno fue aumenta en un factor de diez respecto de la considerada en el Caso 1.

4.6.3.2 Resultados

Se realizó la búsqueda directa por medio de la metodología de optimización propuesta en este trabajo, los resultados de esta simulación se presentan a continuación. Se encuentra el óptimo con los parámetros de la línea que se presentan en la Tabla 4-27.

En la Tabla 4-27 se pueden observar los parámetros de longitud de arco seco – LAS y resistencia de puesta a tierra – RPT, acompañados del número de fallas, por cada una de las 26 estructuras de la línea de transmisión simulada. La información anterior se encuentra discriminada en la tabla para la condición inicial de los parámetros y los resultados obtenidos mediante la metodología de optimización propuesta en este trabajo del Caso 1 y del Caso 3.

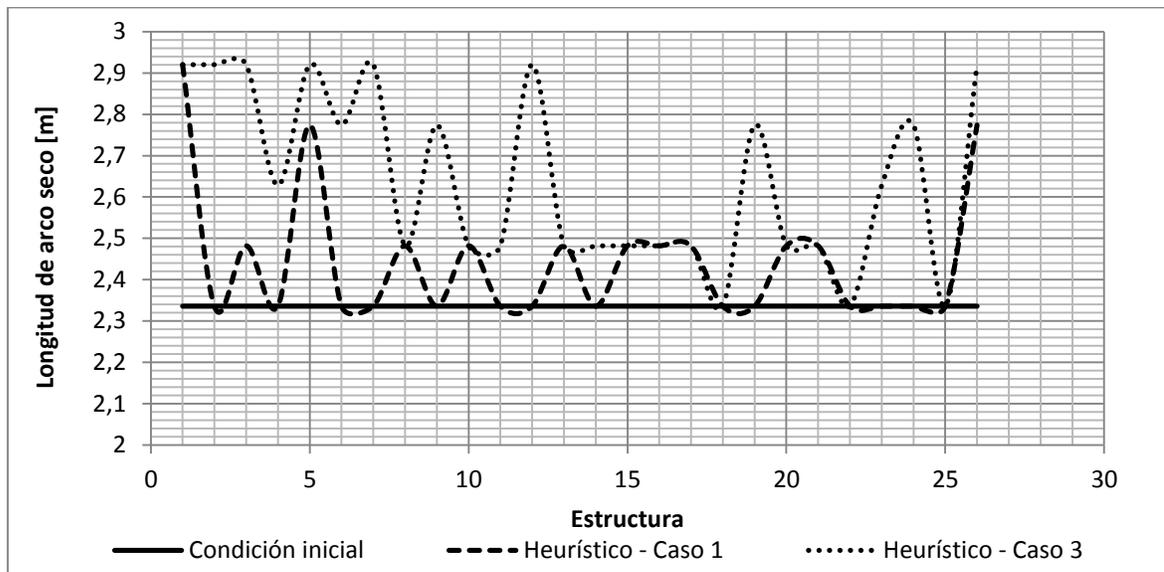
Tabla 4-27: Parámetros de la línea en el valor óptimo encontrado por búsqueda directa heurística – Caso 3.

Método	Condición inicial			Heurístico - Caso 1			Heurístico - Caso 3		
	ESTRUCTURA	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]
1	2,336	40	6	2,920	32	3	2,920	20,000	3
2	2,336	40	4	2,336	38	3	2,920	24,000	3
3	2,336	40	4	2,482	38	3	2,920	20,000	3
4	2,336	40	3	2,336	40	3	2,628	38,000	2
5	2,336	40	7	2,774	34	3	2,920	20,000	3
6	2,336	40	3	2,336	40	3	2,774	32,000	3
7	2,336	40	1	2,336	40	1	2,920	24,000	1
8	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
9	2,336	40	2	2,336	40	2	2,774	34,000	2
10	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
11	2,336	40	2	2,336	40	2	2,482	38,000	2
12	2,336	40	2	2,336	40	2	2,920	32,000	2
13	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
14	2,336	40	1	2,336	40	1	2,482	38,000	1
15	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0

Método	Condición inicial			Heurístico - Caso 1			Heurístico - Caso 3		
	Estructura	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]	Fallas	LAS [m]	RPT [Ω]
16	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
17	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
18	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40,000	1
19	2,336	40	2	2,336	40	2	2,774	34,000	2
20	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
21	2,336	40	0	2,482	40	0	2,482	40,000	0
22	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40,000	1
23	2,336	40	1	2,336	40	1	2,628	36,000	1
24	2,336	40	2	2,336	40	2	2,774	34,000	2
25	2,336	40	1	2,336	40	1	2,336	40,000	1
26	2,336	40	4	2,774	34	2	2,920	20,000	2

Con el fin de analizar adecuadamente los resultados presentados en la Tabla 4-27 se presentan la longitud de arco seco, la resistencia de puesta a tierra y el número de fallas de cada estructura en la Figura 4-22, la Figura 4-23 y la Figura 4-24, respectivamente.

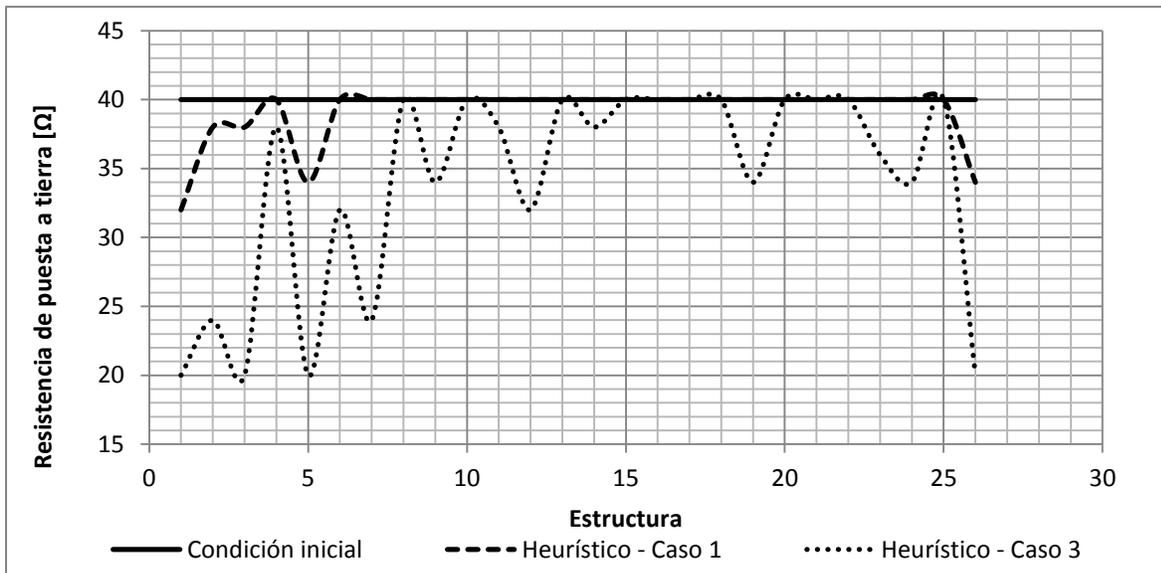
Figura 4-22: Longitud de arco seco de cada estructura – Caso 3.



En la Figura 4-22 se puede observar que mediante la metodología de optimización aplicada al Caso 3 se presenta una variación mayor en la longitud de arco seco respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante la misma metodología de optimización aplicada al Caso 1 se presenta una menor variación de la longitud de arco

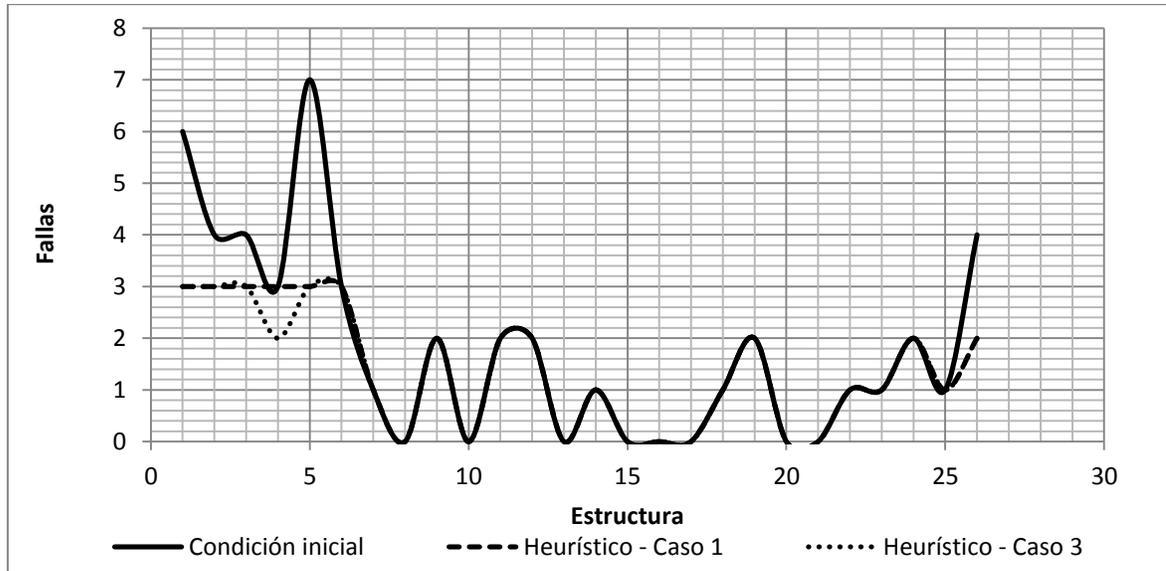
seco. La variación presentada en la longitud de arco seco mediante el método de optimización heurístico del Caso 3 es la esperada en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que la resistividad del terreno es diez veces mayor en comparación con la considerada en el Caso 1, por lo que se espera que se deba realizar una mayor variación en los parámetros de la línea para obtener un mismo número de fallas.

Figura 4-23: Resistencia de puesta a tierra de cada estructura – Caso 3.



En la Figura 4-23 se puede observar que mediante la metodología de optimización aplicada al Caso 3 se presenta una variación mayor en la resistencia de puesta a tierra respecto de la condición inicial de la línea, mientras que mediante la misma metodología de optimización aplicada al Caso 1 se presenta una menor variación de la resistencia de puesta a tierra. La variación presentada en la resistencia de puesta a tierra mediante el método de optimización heurístico del Caso 3 es la esperada en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que la resistividad del terreno es diez veces mayor en comparación con la considerada en el Caso 1, por lo que se espera que se deba realizar una mayor variación en los parámetros de la línea para obtener un mismo número de fallas.

Figura 4-24: Fallas de cada estructura – Caso 3.



En la Figura 4-24 se puede observar que mediante la metodología de optimización aplicada al Caso 3 se presenta un comportamiento similar en las fallas de cada estructura respecto a la misma metodología de optimización aplicada al Caso 1. El comportamiento anterior presentado en las fallas de cada estructura mediante el método de optimización heurístico del Caso 3 es el esperado en la práctica según lo explicado en el numeral 3.4.1, esto debido a que se le exigió el mismo número de fallas totales permitidas N_{Tper} que en el Caso 1, por lo que no se espera una variación significativa en el número de fallas totales calculadas N_{Tcat} .

En la Tabla 4-28 se presenta la solución óptima obtenida por medio de la metodología de optimización propuesta en este trabajo.

Tabla 4-28: Valor óptimo encontrado por la metodología de optimización – Caso 3.

Método	Número de fallas por apantallamiento	Número de fallas por flameo inverso	Número de fallas totales
	[fallas/(100 km-año)]	[fallas/(100 km-año)]	[fallas/(100 km-año)]
Condición inicial	0,41	3,45	3,86
Heurístico	0,41	2,55	2,96

Con base en la información de la Tabla 4-28 se puede observar que mediante la metodología de optimización se obtiene un número de fallas totales inferior al número de fallas totales permitidas $3,00 \text{ Fallas}/100 \text{ km}/\text{Año}$, lo anterior con un error relativo del 1,33%. Para llegar a este resultado por medio de la metodología de optimización se realizó un total de 41 simulaciones.

Con base en los resultados anteriores se puede estimar la reducción en el costo computacional como se muestra en la Tabla 4-29.

Tabla 4-29: Reducción del costo computacional de la metodología de optimización – Caso 3.

Método	Número de simulaciones	Costo computacional
Búsqueda completa	$1,77 \times 10^{45}$	100,00%
Heurístico	41	0,00%
Diferencia	$1,77 \times 10^{45}$	100,00%

En la Tabla 4-29 se puede observar que la reducción en el costo computacional de la metodología de optimización propuesta respecto a la búsqueda completa es de aproximadamente un 100,00%, es decir que el proceso de búsqueda requerido para encontrar la solución óptima mediante la metodología de optimización es despreciable comparado con el de la búsqueda completa.

Por otra parte, se puede estimar la reducción en el costo económico de la solución optimizada comparándola con la mejor solución. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-30.

Tabla 4-30: Reducción en el costo económico de la metodología de optimización – Caso 3.

Método	Costo [\$]	Costo de la solución
Solución inicial	36'400.000	100,00%
Heurístico	13'200.000	36,26%
Diferencia	23'200.000	63,74%

En la Tabla 4-26 se puede observar que la reducción del costo económico de la metodología de heurística respecto a la mejor condición de la línea corresponde a un 63,74%, es decir que se requiere del 36,26% del costo de instalación equivalente a \$13'200.000 con la solución óptima.

5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

De acuerdo con los objetivos propuestos y el desarrollo de este trabajo se puede concluir que:

- Se estableció una metodología de optimización del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra para cada una de las estructuras en líneas de transmisión con relación a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas, teniendo en cuenta las variaciones de la actividad eléctrica atmosférica y los parámetros eléctricos del suelo a lo largo de la misma.
- Se determinaron los criterios de optimización técnicos y económicos del nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión como punto de partida de la metodología de optimización.
- Se determinó el desempeño de las líneas de transmisión con relación a las fallas por descargas eléctricas atmosféricas considerando las variaciones topológicas y ambientales a lo largo de su recorrido, esto utilizando una metodología de simulación basada en modelos matemáticos. Estos modelos incluyen, entre otros elementos, una rutina Monte Carlo para la generación de las descargas, el modelo electrogeométrico para su discriminación y el programa ATP/EMTP [12] para el cálculo de las sobretensiones generadas.
- Se formuló rigurosamente el problema de optimización con su respectiva simplificación y con base en esta formulación se seleccionaron, propusieron e implementaron los métodos de optimización de Nelder-Mead modificado y heurístico a incluir en la metodología de optimización.

- Se generó una metodología de optimización y una herramienta de cálculo basadas en los mismos lineamientos capaces de especificar el nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra de cada estructura de la línea de transmisión que cumplen con los criterios de optimización establecidos.
- Se estudiaron una serie de casos con el fin de validar cada uno de los elementos utilizados en la metodología de optimización propuesta y la metodología por completo. Con base en lo anterior, se demostró que la metodología de optimización propuesta obtiene resultados válidos, prácticos, computacionalmente compactos y eficientes en términos de la reducción económica de las soluciones generadas.

De acuerdo con los resultados de este trabajo y el análisis de los mismos se puede concluir que:

- En la generación aleatoria de descargas utilizada en la metodología de optimización se reproducen adecuadamente las distribuciones de probabilidad de la descarga seleccionadas y la densidad de descargas a tierra simulada representa adecuadamente la densidad de descargas a tierra de entrada, incluyendo la diferenciación de la cantidad de descargas por vanos. Teniendo en cuenta el error presente entre la cantidad de descargas simuladas respecto de las de entrada, en cada uno de los casos a estudiar se debe evaluar la cantidad de años a simular a fin de que se replique adecuadamente las densidades de descargas según la magnitud de esta última.
- En el cálculo de impactos utilizado en la metodología de optimización se obtienen valores similares al de la metodología de referencia [4], con errores relativos inferiores al 14,63%. Este error es debido principalmente a que en la metodología de optimización propuesta las descargas se generan con base en el método Monte Carlo, mientras que en la metodología de la referencia [4] se parte de un número determinado de descargas con base en la distribución de probabilidad de corriente.
- En el cálculo de fallas utilizado en la metodología de optimización se obtienen valores similares respecto a los resultados de la metodología del T-FLASH, con errores

relativos inferiores al 13% para densidades de descargas a tierra menores a 5 descargas/km²*año e inferiores al 45% para densidades de descargas a tierra mayores a 5 descargas/km²*año. Este error es debido principalmente a que en la metodología de optimización propuesta se simulan las tensiones de forma detallada, mientras que en la metodología del T-FLASH se utilizan expresiones analíticas aproximadas para realizar el mismo cálculo.

- De acuerdo con la validación del método de optimización de Nelder-Mead modificado utilizado en la metodología de optimización se concluye que el método es computacionalmente compacto y eficiente, generando una reducción en el costo computacional respecto al espacio de búsqueda del 92,18% y una reducción en el costo económico respecto de la mejor solución del 83,33% en los casos estudiados. Sin embargo, teniendo en cuenta que el método es de carácter local que carece de alguna componente aleatoria y que la función objetivo estudiada en este trabajo es compleja debido a que es no lineal, no convexa y no diferenciable no es segura su convergencia en algunos casos.
- De acuerdo con la validación del método de optimización heurístico utilizado en la metodología de optimización se concluye que el método es computacionalmente compacto y eficiente, generando una reducción en el costo computacional respecto al espacio de búsqueda del 99,98% y una reducción en el costo económico respecto de la mejor solución del 28,57% en los casos estudiados. Debido a la naturaleza práctica de este método se asegura convergencia en la totalidad de los casos y selectividad en las estructuras y parámetros en los que se plantean las modificaciones.
- De acuerdo con la aplicación de la metodología de optimización se concluye que el método de optimización heurístico funciona de mejor manera que el método de optimización de Nelder-Mead modificado para esta aplicación particular. Lo anterior debido a que mostró ser más computacionalmente compacto y eficiente, generando una reducción en el costo computacional respecto al espacio de búsqueda cercana al 100,00% y una reducción en el costo económico respecto de la mejor solución del 91,48%, valores que fueron superiores a los obtenidos mediante el método de optimización de Nelder-Mead Modificado en el mismo caso estudiado.

- También, de acuerdo con la aplicación de la metodología de optimización se concluye que el método de optimización heurístico se aproxima de mejor manera a lo esperado en la práctica, generando selectividad en las estructuras y parámetros en los que se plantean las modificaciones, lo anterior variando por ejemplo el costo de sus parámetros o los parámetros eléctricos del suelo de la línea de transmisión.
- Aunque tanto el método de optimización de Nelder-Mead modificado como el método de optimización heurístico implementados en la metodología de optimización permiten especificar el nivel de aislamiento eléctrico y la resistencia de puesta a tierra de cada estructura de la línea de transmisión que cumplen con los criterios de optimización establecidos, debido a los resultados obtenidos se recomienda utilizar principalmente del método de optimización heurístico para esta aplicación. Por su parte, el método de optimización de Nelder-Mead modificado se podrá utilizar como respaldo o complemento del método de optimización heurística cuando se requiera.
- Según los resultados obtenidos de los casos estudiados en la aplicación de la metodología de optimización, se concluye que se pueden obtener diversas soluciones óptimas de una línea de transmisión de acuerdo con las condiciones de diseño. Por ejemplo, si la línea tiene restricciones respecto al costo o a los valores que puede tomar la longitud de arco seco, se espera una modificación proporcional en la resistencia de puesta a tierra a fin de cumplir un mismo requerimiento, como se presentó en el Caso 2.
- También, si se presentan altas variaciones topológicas o ambientales a lo largo del recorrido de la línea que afecten directamente uno de los parámetros de diseño, se esperan modificaciones proporcionales en el parámetro restante; como por ejemplo, ante aumento en la resistividad del terreno que afecta en gran medida la resistencia de puesta a tierra, se espera una modificación proporcional en la longitud de arco seco, como se presentó en el Caso 3. El conocimiento de las anteriores relaciones permite direccionar el diseño de los parámetros de la línea de transmisión de tal forma que se obtenga la solución óptima apta de acuerdo con las condiciones particulares de aplicación.

5.2 Trabajos futuros

Con este trabajo se avanzó en la ingeniería por desempeño utilizada en el diseño de líneas de transmisión, abriendo las puertas a nuevos estudios referentes a su desempeño ante descargas eléctricas atmosféricas, por lo que se planteó un procedimiento de cálculo que obtiene en detalle el desempeño de la línea sin despreciar las particularidades que se presentan en el recorrido de la misma. De acuerdo con lo anterior y el desarrollo de este trabajo se pueden generar los siguientes trabajos futuros que complementen o mejoren la metodología de optimización propuesta:

- Estudiar otros parámetros que pueden ser modificados con el fin de minimizar las fallas por impactos directos en líneas de transmisión como por ejemplo el apantallamiento de la línea o los descargadores de sobretensión.
- Estudiar la posibilidad de implementar elementos adicionales en el la discriminación de las descargas que corresponden a impactos directos en la línea como por ejemplo la superficie e inclinación del terreno y objetos cercanos que tengan influencia en el modelo electrogeométrico.
- Estudiar la posibilidad de implementar otros métodos de optimización utilizando los demás planteamientos de la metodología de optimización.
- Estudiar la posibilidad de implementar otros modelos detallados en la simulación de las sobretensiones generadas por descargas eléctricas atmosféricas.

A. Anexo: Herramienta de cálculo OTL

Paralelamente a la metodología optimización, se elaboró la herramienta de cálculo OTL en C# que contiene los mismos lineamientos y modelos matemáticos utilizados en la metodología principal, esto con el fin de obtener de forma práctica los resultados buscados. C# es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado y estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma .NET.

La herramienta de cálculo OTL cuenta con tres ventanas principales llamadas “Datos de entrada”, “Resultados” y “Gráficas de la línea”. En la ventana “Datos de entrada” se parametrizan los datos del caso de estudio y se encuentran los botones utilizados para realizar cada uno de los cálculos implementados en la metodología a de optimización. La ventana “Datos de entrada” se presenta en la Figura 5-1.

Figura 5-1: Ventana “Datos de entrada” de la herramienta OTL.

The screenshot shows the OTL software interface with the following sections and data:

Datos generales

- Nivel cerámico del sito (Td): Nivel cerámico del sito (Td)
- Densidad de descargas a tierra (Ng): Densidad de descargas a tierra (Ng)
- Auto bundling: Auto bundling
- Años a simular: 100 Años
- Tensión del sistema: 220 kVrms L-L
- #Ph: 4

Número de fallas

- # de fallas permitidas por apartamiento: 0 Fallos/100 km/Año
- # de fallas permitidas por flameo inverso: 3.00 Fallos/100 km/Año
- # de fallas totales permitidas: 3.00 Fallos/100 km/Año
- Factor de seguridad: 0 %

Límites de diseño predeterminados

- Longitud de arco seco de la cadena de aisladores: Valor mínimo 2.336 m, Máximo 2.92 m
- Resistencia de puesta a tierra de la torre: Valor mínimo 20 Ohm, Máximo 40 Ohm

Datos económicos y de convergencia

- Valor de 2 Ohm menos: 100000 \$
- Valor de un aislador: 100000 \$
- Precisión de convergencia deseada: 1 %

Estructura

#	Ph.no	Rn [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Hortz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.0335	0.122	-5	29	29
2	2	0	1.0335	0.122	5	25	25
3	3	0	1.0335	0.122	-5	21	21
4	4	0	0.489	1.4827	0	36	36

Topología de la línea

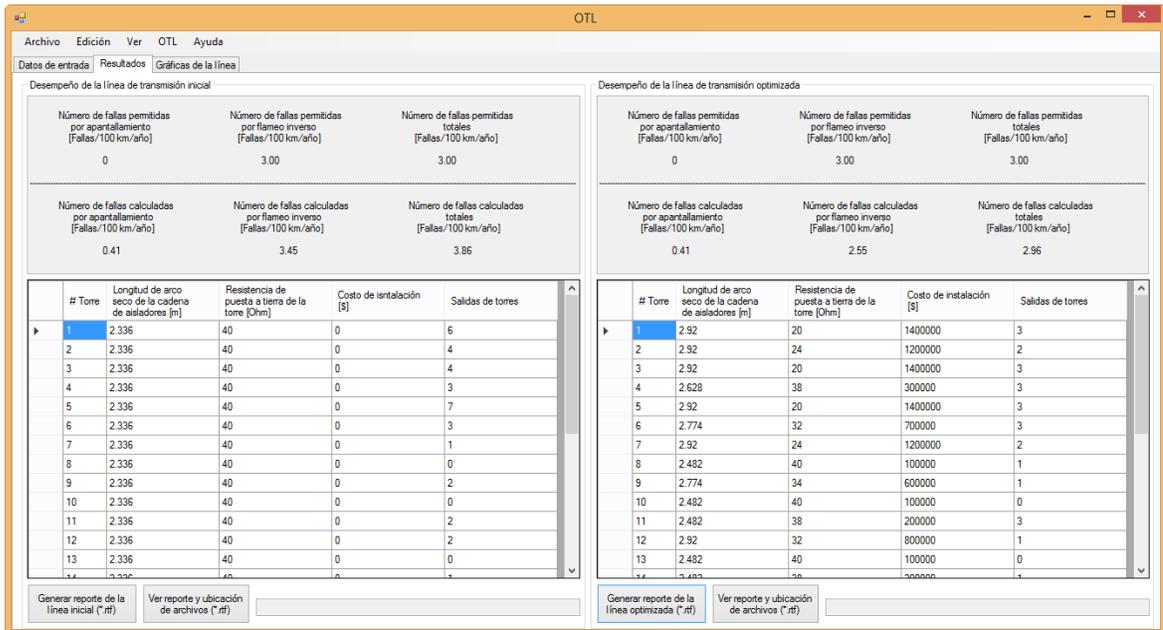
# Torre	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	Altura de pata [m]	Resistividad del suelo [ohm·m]	Longitud de arco seco de la cadena de aisladores [m]	Resistencia de puesta a tierra de la torre [Ohm]	Longitud de arco seco mínima [m]	Longitud de arco seco máxima [m]	Resistencia de puesta a tierra mínima [Ohm]	Resistencia de puesta a tierra máxima [Ohm]
24	11.9055	2.8398	0	0	5000	2.336	40	2.336	2.92	20	40
25	12.3922	2.8237	0	0	5000	2.336	40	2.336	2.92	20	40
26	12.8676	2.7183	0	0	5000	2.336	40	2.336	2.92	20	40

Bottom Section (Calculation Buttons):

- Calcular Ng de entrada
- Calcular Ng de simulación
- Monte Carlo
- Optimizar búsqueda completa
- Optimizar búsqueda directa NM
- Optimizar búsqueda directa Heu
- Limpiar límites de diseño
- Corteo de descargas

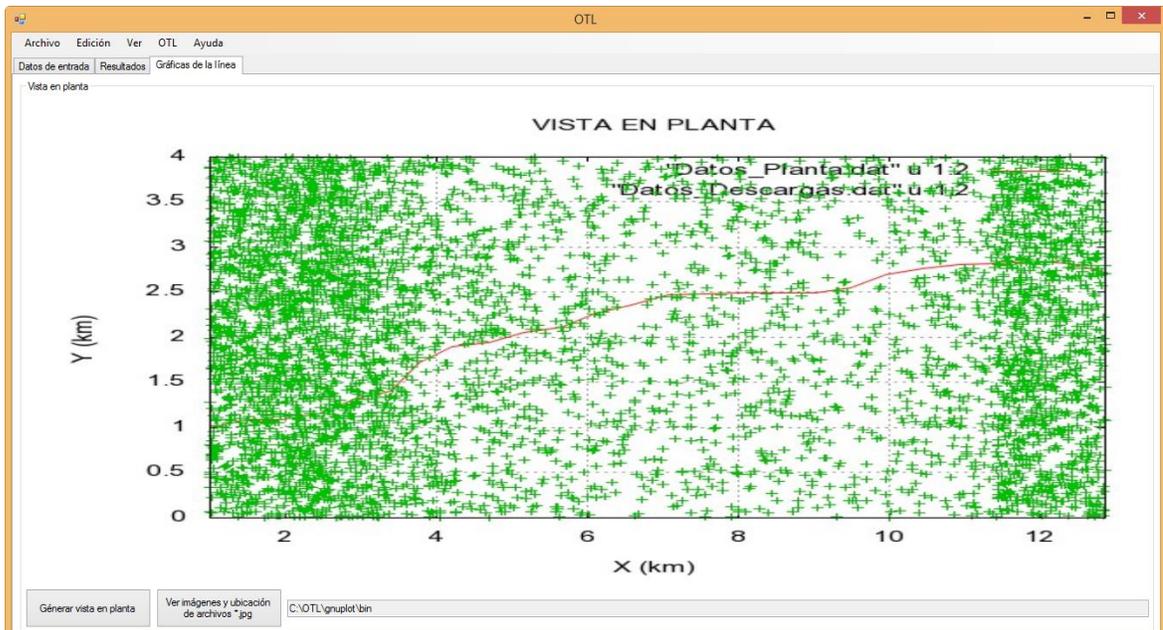
En la ventana “Resultados” se presentan los valores obtenidos mediante la metodología de optimización del desempeño de la línea de transmisión ante descargas eléctricas atmosféricas, acompañado de la longitud de arco seco, la resistencia de puesta a tierra, el costo de instalación y el número de fallas por cada estructura. Lo anterior se muestra discriminado para la línea de transmisión inicial y la línea de transmisión optimizada. La ventana “Resultados” se presenta en la Figura 5-2.

Figura 5-2: Ventana “Resultados” de la herramienta OTL.



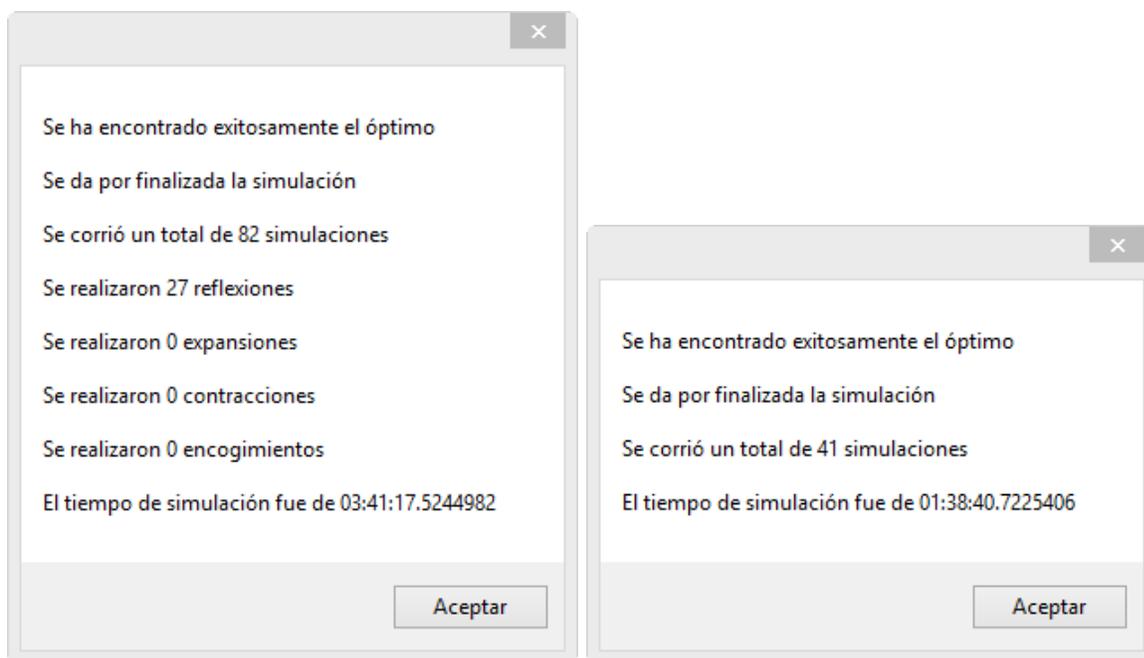
En la ventana “Gráficas de la línea” se presenta gráficamente el área de trabajo, la línea de transmisión y cada una de las descargas eléctricas atmosféricas simuladas en el caso. En la gráfica generada el trazo representa el recorrido de la línea de transmisión, mientras que las cruces representan cada una de las descargas eléctricas atmosféricas simuladas. La ventana “Gráficas de la línea” se presenta en la Figura 5-3.

Figura 5-3: Ventana “Gráficas de la línea” de la herramienta OTL.



Por otra parte, la herramienta OTL cuenta con una serie de ventanas emergentes que contienen información referente al caso de estudio como el estado de la convergencia, el número de simulaciones realizadas y el tiempo de simulación. Estas ventanas informan si la simulación se detuvo porque se alcanzó alguno de los límites máximo, mínimo y de convergencia o porque efectivamente se ha encontrado el óptimo como se muestra en la Figura 5-4.

Figura 5-4: Ejemplo de ventanas emergentes de la herramienta OTL.



Finalmente, a la herramienta se le agregaron algunos elementos periféricos para facilitar el manejo de datos, como los botones “Guardar proyecto” y “Abrir proyecto” que como sus nombres lo indican, permiten guardar y abrir la información de cada caso estudiado, esto teniendo en cuenta cantidad elevada de datos que se pueden tener para cada caso.

Bibliografía

- [1] J. Peña García, “Análisis de fallas en las líneas de transmisión del Grupo Empresarial ISA,” 2008.
- [2] I. A. M. Umaña, “Características de las descargas atmosféricas y su efecto sobre las líneas de transmisión,” *Corona*.
- [3] “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines,” *IEEE Std 1410-2010 Revis. IEEE Std 1410-2004*, pp. 1–73, Jan. 2011.
- [4] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. CRC Press, 1999.
- [5] CREG, “Resolución No. 098, Por la cual se modifica el Anexo CC1 del Código de Conexión (Resolución CREG-025 de 1995).,” 2000.
- [6] “IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination,” *IEEE Std 13132-1999*, p. i-, 1999.
- [7] *EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 KV and Above*, Third Edition. Electric Power Research Institute, 2005.
- [8] “Estimating lightning performance of transmission lines. II. Updates to analytical models,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 3, pp. 1254–1267, Jul. 1993.
- [9] *ANSI C29.1 American National Standard - Test Methods for Electrical Power Insulators*. 1988.
- [10] *ANSI C29.2 American National Standard for Insulators - Wet-Process Porcelain and Toughened Glass - Suspension Type*. 1992.
- [11] “IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques,” *IEEE Std 4-2013 Revis. IEEE Std 4-1995*, pp. 1–213, May 2013.
- [12] *Alternative Transients Program (ATP) Rulebook*, Canadian/American EMTP User group. 1987.
- [13] IEC, “IEC 60364-4-44: Electrical installations of buildings - Part 4-44: Protection for safety - Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances.” 2001.
- [14] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” *IEEE Std 80-2013 Revis. IEEE Std 80-2000 Inc. IEEE Std 80-2013Cor 1-2015*, pp. 1–226, 2013.
- [15] *NTC 2050 - NORMA TÉCNICA COLOMBIANA - CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO*. 1998.
- [16] *NTC 4552 - NORMA TÉCNICA COLOMBIANA - PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. PRINCIPIOS GENERALES*. 2014.
- [17] *REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE)*. 2013.
- [18] *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos*. Universidad de Antioquia, 2007.
- [19] G. E. Company, G. E. C. P. UHV, and E. P. R. Institute, *EPRI Transmission line reference book, 345 kV and above*, Second edition. Electric Power Research Institute, 1982.

- [20] COES - SINAC, *PR-20 PROCEDIMIENTO TÉCNICO DEL COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SEIN*. 2013.
- [21] L. Ekonomou, D. P. Iracleous, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, "An optimal design method for improving the lightning performance of overhead high voltage transmission lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 6–7, pp. 493–499, Apr. 2006.
- [22] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Std 1243-1997*, p. 0_1-, 1997.
- [23] "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 918–932, Jul. 1985.
- [24] F. G. Yugcha Guevara, "Cálculo del comportamiento de una línea de transmisión frente al flameo inverso basado en el método Montecarlo," 2010.
- [25] J. A. Martínez and F. Castro-Aranda, "Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 2200–2210, Jul. 2005.
- [26] A. Ametani and T. Kawamura, "A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 867–875, Apr. 2005.
- [27] I. M. Dudurych, T. J. Gallagher, J. Corbett, and M. V. Escudero, "EMTP analysis of the lightning performance of a HV transmission line," *Gener. Transm. Distrib. IEE Proc.*, vol. 150, no. 4, pp. 501–506, Jul. 2003.
- [28] M. A. Ismaili, P. Bernard, R. Lambert, and A. Xemard, "Estimating the probability of failure of equipment as a result of direct lightning strikes on transmission lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 4, pp. 1394–1400, Oct. 1999.
- [29] J. A. Martínez and F. Castro-Aranda, "Modeling overhead transmission lines for line arrester studies," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004*, 2004, p. 1125–1130 Vol.1.
- [30] J. París, S. Martínez, F. Navarrina, I. Colominas, and M. Casteleiro, "Structural Optimization of High Voltage Transmission Line Towers considering Continuum and Discrete Design Variables," *GMNI—Group Numer. Methods Eng.*
- [31] S.K. Salman and R.N. Allan, "Application of optimisation techniques to the design of very-high-voltage power lines," *IEE*, vol. 126, 1979.
- [32] Y. Li, Q. Yang, W. Sima, J. Li, and T. Yuan, "Optimization of Transmission-Line Route Based on Lightning Incidence Reported by the Lightning Location System," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1460–1468, Jul. 2013.
- [33] H. M. Khodr, A. M. e Moura, and V. Miranda, "Optimal Design of Grounding System in Transmission Line," in *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*, 2007, pp. 1–9.
- [34] C. A. Christodoulou, L. Ekonomou, G. P. Fotis, N. Harkiolakis, and I. A. Stathopoulos, "Optimization of Hellenic overhead high-voltage transmission lines lightning protection," *Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 502–509, Apr. 2009.
- [35] IEC, "IEC 60071-2. Insulation Co-ordination, Part 2: Application Guide." 1996.
- [36] *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*. Cigre, 1991.
- [37] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," *IEEE Std 1410TM-2004*, 2004.
- [38] "Protection against lightning – Part 2: Risk management," *IEC 62305-2*, 2006.
- [39] R. B. Anderson, "Lightning Parameters for Engineering Application," *Electra* 69, 1980.
- [40] R. Y. Rubinstein, *Simulation and the Monte Carlo Method*. Wiley, 1981.

- [41] H. K. Hoidalén, *ATPDraw User's Manual*. 1998.
- [42] Dommel H. W., *Electromagnetic Transients Program Manual (EMTP Theory Book)*. Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986.
- [43] J. R. Marti, "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157, Jan. 1982.
- [44] "IEC TR 60071-4 - Insulation co-ordination - Part4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks." 2004.
- [45] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Insulator String Flashover Modeling with the aid of an ATPDraw Object," in *Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International*, 2011, pp. 1–5.
- [46] T. Shindo and T. Suzuki, "A New Calculation Method of Breakdown Voltage-Time Characteristics of Long Air Gaps," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-5, no. 6, pp. 65–66, Jun. 1985.
- [47] L. Dubé, *Users Guide to Models in ATP*. 1996.
- [48] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Impulse Resistance of Concentrated Tower Grounding Systems Simulated by an ATPDraw Object," *Pap. Submitt. Int. Conf. Power Syst. Transients IPST2011 Delft Neth. June 14-17 2011*, 2011.
- [49] "Tipos de Problemas de Optimización | NEOS." [Online]. Available: <http://www.neos-guide.org/optimization-tree>. [Accessed: 04-Oct-2016].
- [50] Ton Van Den Boom and Bart De Schutter, *Optimization in Systems and Control - Lecture Notes for the Course SC 4090*. 2007.
- [51] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *The Computer Journal*, 1965.
- [52] M. J. Zapatero Moreno, J. Alegre Martínez, and J. Pacheco Bonrostro, "Análisis de algunas metaheurísticas creadas a partir de 'Optimización Gravitatoria,'" *XIX Jorn. ASEPUMA – VII Encuentro Int. An. ASEPUMA N° 19 0902*.
- [53] Prokop Moravec, Juraj Hliník, and Pavel Rudolf, "Optimization of hydraulic turbine diffuser," *EPJ Web of Conferences*, 2016.
- [54] Margaret H. Wright, "Nelder, Mead, and the Other Simplex Method," *Doc. Math. · Extra Vol. ISMP 2012 271–276*, 2010.
- [55] "Microsoft Excel 2010 | Microsoft Office." [Online]. Available: <https://products.office.com/en-us/microsoft-excel-2010>.