

Mejoramiento del Desempeño de Líneas de Distribución ante Impacto de Rayos  
Mediante el Uso de Algoritmos Genéticos.

Carlos Mario Jaimes Mejia y Oscar Fernando Diaz Diaz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director

Edison Andrés Soto Ríos

Doctorado en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

A mi Madre, Padre, Hermano y Natalia que siempre estuvieron presente para brindarme apoyo. Esto es gracias a ustedes.

A Morita, que desde el cielo cuidas mis pasos. ¡Te voy a extrañar siempre!

*Carlos Jaimes.*

A mis Padres, Hermanas y Milena por estar presentes en este camino, en especial a mi Madre Nancy que siempre estuvo presente en mis momentos más difíciles y siempre fue un apoyo incondicional en mi vida, Todo se lo debo a ella y que este proyecto sea una de las muchas alegrías venideras que le pueda brindar, a todos infinitas gracias.

*Oscar Diaz.*

### **Agradecimientos**

A nuestro profesor y gran amigo Edison Soto por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A todas las personas que de una u otra forma aportaron en la realización de este trabajo.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo general .....	14
1.2. Objetivos específicos.....	14
2. Antecedentes bibliográficos. ....	15
2.1. Categorización del rayo.....	15
2.2. Proceso de formación del rayo .....	16
2.3. Parámetros de las descargas atmosféricas .....	18
2.4. Características de las descargas electricas atmosfericas .....	19
2.4.1. Forma de onda .....	19
2.4.2. Distribución log-normal .....	20
3. Metodología.....	21
3.1. Propuesta de ejecucion. ....	21
3.2. Topología y parametros de las líneas .....	22
3.3. Tiempo de simulacion de los casos de estudio.....	22
3.3.1. Calculo del tiempo de simulación línea recta.....	23
3.3.2. Calculo del tiempo de simulacion línea en configuracion T .....	24
3.4. Método de Montecarlo .....	24
3.5. Estrategía de eliminación de casos.....	26
3.5.1. Formula heurística de Rusck. ....	26
3.6. Desempeño ante impactos indirectos de una línea de distribución. ....	27

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.	5
3.6.1. Calculo tensiones inducidas. ....	27
3.7. Algoritmos genéticos.....	29
3.8. Planteamiento del problema .....	29
3.8.1. Funcionamiento del algoritmo.....	30
3.8.2. Función objetivo.....	31
3.9. Calculo tasa de falla de la línea. ....	33
3.10. Desarrollo de los casos base .....	33
3.10.1. Desempeño línea recta caso base. ....	34
3.10.2. Desempeño línea en configuración T .....	35
4. Resultados optimización.....	36
4.1. Optimización línea recta.....	36
4.1.1. Resultado optimización línea recta descargadores de sobretensión (DPS) .....	36
4.1.2. Resultado optimización línea recta sistemas de puesta a tierra (SPT) .....	37
4.1.3. Resultado optimización línea recta DPS y SPT .....	37
4.2. Optimización línea en configuración T. ....	37
4.2.1. Resultado optimización línea en configuración T para DPS.....	38
4.2.2. Resultado optimización línea en configuración T para SPT. ....	38
4.2.3. Resultado optimización línea en configuración T para DPS y SPT.....	39
4.3. Análisis de los resultados obtenidos.....	39
5. Análisis técnico económico.....	41
5.1.1. Función de costos. ....	41
5.2. Aplicación de la función técnico - económica a los resultados optimizados. ....	44
5.2.1. función de costos aplicada a configuración DPS+SPT para las líneas.....	45

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.	6
5.2.2.Soluciones alternativas para la función de costos. ....	46
6. Conclusiones y recomendaciones.....	48
7. Trabajos futuros.....	49
Referencias bibliográficas.....	50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Expresión alternativa para la densidad de descargas a tierra en áreas tropicales .....	19
Tabla 2. Parámetros de forma onda .....	19
Tabla 3. Parámetros físicos de las líneas simuladas. ....	22
Tabla 4. Parámetros de la distribución de probabilidad log normal. ....	25
Tabla 5. Posición optima de dispositivos de protección en configuración línea recta. ....	36
Tabla 6. Posición optima de dispositivos de protección en configuración línea T.....	38
Tabla 7. Materiales que componen un kit de SPT. ....	44
Tabla 8. Valor unitario variables función técnico-económica. ....	44
Tabla 9. Función de costos DPS+SPT. ....	45
Tabla 10 Resultados alternativos de la función de costos.....	46

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Categorías del rayo.....	15
Figura 2. Proceso de desarrollo rayo descendente negativo .....	18
Figura 3. Descripción de los parámetros de la onda de corriente. ....	20
Figura 4. Topología línea recta caso base. ....	21
Figura 5. Topología línea en T caso base .....	22
Figura 6. Estimación tiempo de simulación línea recta .....	23
Figura 7. Estimación tiempo de simulación línea en forma de T .....	24
Figura 8. Diagrama de flujo del módulo de algoritmo genéticos y YALUK DRAW .....	31
Figura 9. Disposición física de las líneas recta y en forma de T. ....	34
Figura 10. Tasa de fallas para línea recta.....	34
Figura 11. Tasa de fallas para línea en forma de T.....	35
Figura 12. Comparativa caso base vs optimizaciones en configuración línea recta. ....	40
Figura 13. Comparativa caso base vs optimizaciones en configuración línea T. ....	40

## Glosario

**Algoritmos Genéticos:** Algoritmo de optimización de búsqueda que basa su filosofía en las leyes de la evolución natural y evolución genética. Básicamente un algoritmo genético se basa en tres operaciones: selección, operación genética y remplazo.

**Descarga de retorno:** Onda de campo eléctrico ascendente que fluye por el líder escalonado (Torres, 2002) luego de la formación del embudo producto del cierre del canal producido entre la carga de las gotas en tierra y la segunda carga en la mitad de la nube. Es la primera descarga que se produce por parte de la nube la cual contiene un valor de magnitud de corriente alrededor de los cien mil Amperios y es la fase más energética del rayo por lo que es la que mayor magnitud de corriente puede contener.

**Descargador de Sobretensiones o DPS:** Equipo diseñado para proteger los elementos de un sistema de potencia ante sobretensiones por descargas atmosféricas, maniobra o transitorios. Está compuesto por una serie de pastillas de óxido de zinc, con una característica de resistencia no lineal que a tensión nominal presenta una impedancia capacitiva de gran valor lo que implica que la corriente no fluya a través del equipo en tanto que cuando la tensión alcanza el orden de los kV la impedancia se convierte en una resistencia baja lo que permite que la energía sea disipada a través de la tierra.

### Resumen

**Título:** Mejoramiento del desempeño de líneas de distribución ante impacto de rayos mediante el uso de algoritmos genéticos.

**Autor:** Carlos Mario Jaimes Mejia ,Oscar Fernando Diaz Diaz \*\*

**Palabras clave:** Tensiones inducidas, campo electromagnético, descarga de retorno, algoritmos genéticos, descargas atmosféricas.

**Descripción:** El siguiente trabajo de investigación muestra como a partir del desempeño de dos configuraciones de línea (recta y en forma de T) sin elementos de protección ante impactos de rayos se obtiene la tasa falla que expresa la salidas cada kilómetro por año, con base en estos resultados y por medio del software especializado Yaluk-Draw y haciendo uso del módulo de algoritmos genéticos se propuso una función objetivo que muestra una mejora en el desempeño de las líneas de distribución a partir de un módulo de optimización el cual generó la cantidad y la posición de descargadores de sobretensión, resistencia de puesta a tierra y la combinación entre ambos a través de la disminución de la tasa de falla el cual funciono como medio comparativo para reconocer la mejora en el desempeño de las respectivas líneas de distribución.

A partir de los resultados obtenidos de la tasa de fallas que representa la combinación entre descargadores de sobretensión y resistencia de puesta a tierra para cada una de las líneas se planteó una función de costos que tiene como objetivo analizar la viabilidad técnico-económica de la mejor solución técnica planteada producto de los algoritmos genéticos, para así evaluar su posible ejecución.

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingerirías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.  
Director: Edison Andrés Soto Ríos. Doctor en Ingeniería.

**Abstract**

**Title:** Improvement of the performance of distribution lines against lightning strikes using genetic algorithms

**Author:** Carlos Mario Jaimes Mejia ,Oscar Fernando Diaz Diaz \*\*\*

**Key words:** Induced voltages, electromagnetic field, lightning return discharge, genetics algorithms, lightning.

**Description:** The following research work shows how from the performance of two-line configurations (straight and T-shaped) without any protection against lightning strikes, the flashover rate expresses the number of annual insulation flashovers per 100 km of distribution line, according to these results and using the YALUK-ATP software, making use of the genetic algorithms module, an objective function was proposed that shows an improvement in the performance of distribution lines by optimizing the number and position of surge arresters, grounding resistance and the combination of both through a decrease in the flashover rate.

Based on the results obtained from the combination of surge arresters and grounding resistance for each of the lines, a costs function was proposed that aims to analyze the technical-economic feasibility of the solution for its application.

---

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Edison Andrés Soto Ríos. PhD in Engineering.

## Introducción

Las descargas atmosféricas son fenómenos meteorológicos que desde las primeras civilizaciones han sido objeto de interpretaciones e investigaciones, sin embargo, hasta finales del siglo XVIII los trabajos de los electricistas y en especial el de Benjamín Franklin sentarían las bases de la teoría actual.

Diversas publicaciones indican que la principal causa de fallas en las líneas de distribución se debe a descargas atmosféricas, este tipo de descargas puede generar dos clases de interrupciones: momentáneas (si la disminución en la tensión es menor a un minuto) o permanentes (si la disminución en la tensión es mayor a un minuto ) debido a: cortocircuitos, malas maniobras, descargas atmosféricas, etc. (Murillo, 2012). Sin embargo, desde que la energía eléctrica se convirtió en servicio esencial para desarrollar labores industriales o simplemente para el que hacer de las actividades en los hogares, las empresas de distribución han centrado sus esfuerzos en garantizar la “calidad del servicio de energía” que suministran.

Las descargas eléctricas atmosféricas a tierra pueden provocar fallas por flameos en los aisladores que sostienen las líneas cuando las sobretensiones superan la rigidez dieléctrica del aislamiento.

Las descargas que generan una falla en el sistema de distribución son:

1. Impactos directos sobre los conductores de fase
2. Impactos directos sobre el conductor de guarda o la estructura de soporte
3. Impactos indirectos en cercanías de la línea.

Los impactos directos sobre una línea de distribución sin protección alguna generalmente producen una falla en el aislamiento provocando un flameo. (*IEEE Std 1410*, 2010)

Los impactos indirectos los cuales son objeto de estudio en este trabajo de investigación pueden causar interrupciones momentáneas o permanentes de acuerdo con la tensión inducida que provoquen sobre la línea, estos impactos son mucho más comunes y generalmente no superan los 300 kV, por lo que son de gran interés en líneas de distribución y han sido profundamente estudiado por investigadores de todo el mundo.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Optimizar el desempeño de una línea de distribución ante impacto indirecto de rayos haciendo uso de algoritmos genéticos, lo que permitirá disminuir la tasa de falla para diferentes configuraciones (línea recta y línea en forma de T).

### **1.2. Objetivos específicos**

- Ubicar de forma óptima descargadores de sobretensión en líneas de distribución haciendo uso de algoritmos genéticos.
- Encontrar la mejor ubicación y valores de resistencia de puestas a tierra que permitan mejorar el desempeño de los dos tipos de tramo ante impacto de rayos.
- Definir las mejores combinaciones en términos de ubicación de los DPS y sistema de puesta a tierra que permitan disminuir la tasa de fallas.
- Realizar un análisis técnico-económico de las combinaciones encontradas en el tercer objetivo para obtener la configuración más viable.

## 2. Antecedentes bibliográficos.

Este capítulo pretende abarcar de una manera resumida pero concreta los conceptos fundamentales que permitan al lector entender el comportamiento de los rayos.

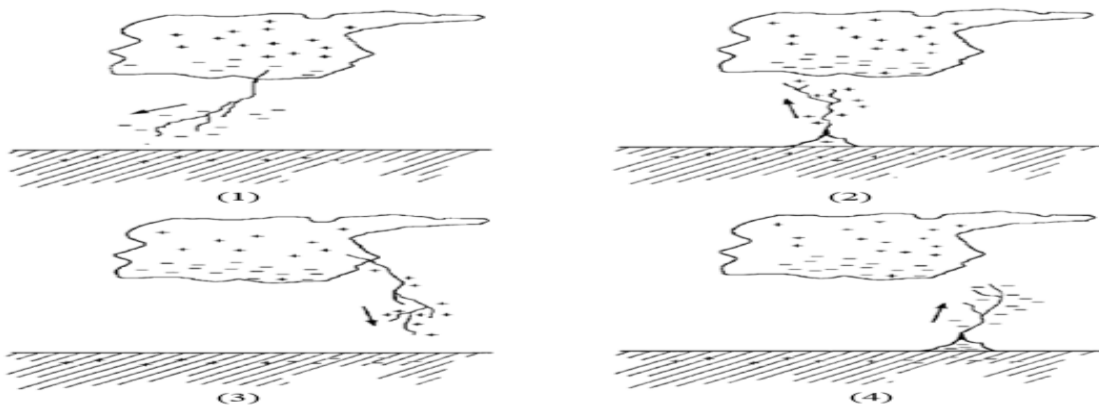
### 2.1. Categorización del rayo.

De acuerdo con la polaridad de la carga observada en el proceso de iniciación y la dirección de propagación del líder se conocen cuatro tipos diferentes de rayos (ver figura 1):

1. Rayo descendente con polaridad negativa.
2. Rayo ascendente con polaridad positiva.
3. Rayo descendente con polaridad positiva.
4. Rayo ascendente con polaridad positiva.

De acuerdo con mediciones realizadas, los rayos descendentes con polaridad negativa representan alrededor del 90% (Rakov & Uman, 2003) de los impactos a nivel global y los rayos descendentes con polaridad positiva menos del 10% siendo estos dos tipos de rayos los más comunes y estudiados. Sin embargo, los rayos tipo 3 y 4 suele ocurrir únicamente en objetos altos (más de 100 metros aproximadamente).

Figura 1.  
*Categorías del rayo.*



Nota. Adaptado de (Rakov & Uman, 2003)

## 2.2. Proceso de formación del rayo

La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva  $p$  situada debajo de la nube y la carga negativa  $N$  de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo.

En la actualidad sigue siendo tema de debate el cómo se inicia la descarga eléctrica pero gran parte de la comunidad científica está de acuerdo que una descarga eléctrica nube - tierra se compone de las siguientes cinco etapas (ver figura 2):

1. Encendido de la descarga (Preliminary breakdown)
2. Líder escalonado (Stepped leader)
3. Proceso de enlace (Attachment process)
4. Descarga de retorno (Return stroke)
5. Líder dardo (Dart leader)

El proceso de formación del rayo comienza por un proceso en la nube llamado encendido de la descarga, actualmente no se ha establecido un mecanismo para el desarrollo de este proceso, pero se cree que puede ser una descarga que une la carga negativa con la carga negativa más baja. El proceso de encendido de la descarga puede durar desde 1 milisegundo hasta los 10 milisegundos y proporciona las condiciones para la formación del líder escalonado que es un canal de plasma cargado negativamente con dirección al suelo a una velocidad promedio de  $2 \times 10^5$  m/s en una serie de pasos directos típicamente de  $1 \mu\text{s}$  y algunas decenas de metros, siendo el intervalo de tiempo entre 20 a  $50 \mu\text{s}$ .

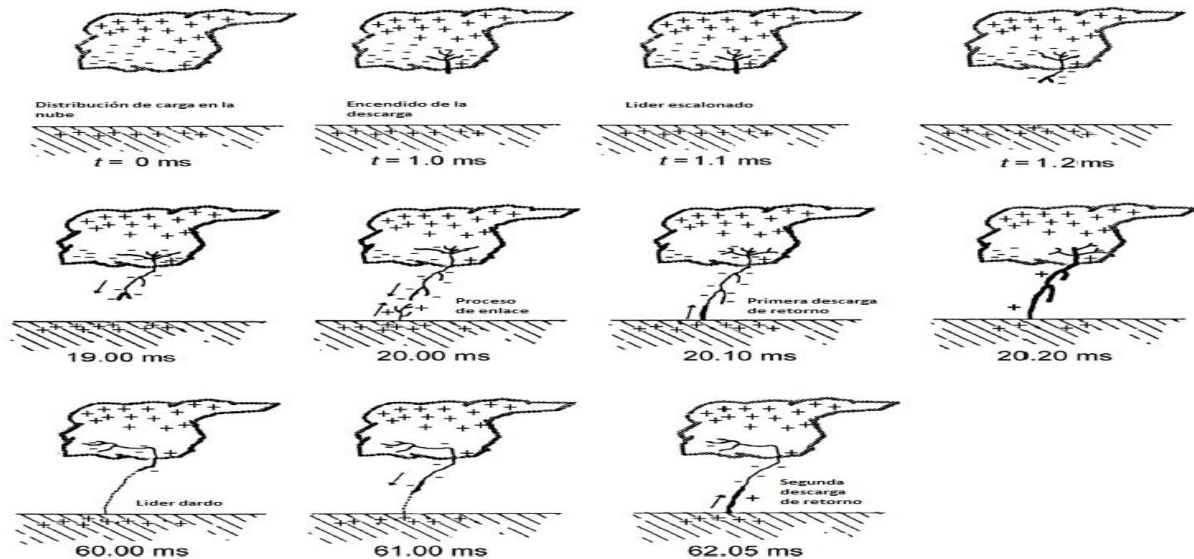
El líder escalonado forma un camino entre la carga de la nube y la tierra, varios Coulomb de carga negativa se distribuyen sobre el canal y en consecuencia se puede ver al líder escalonado como un proceso que remueve la carga negativa desde la nube y la deposita en el canal. La duración del líder escalonado es de algunas decenas de milisegundos y la corriente líder promedio se ubica entre 100 a 1000 [A].

La diferencia de potencial entre la base del líder descendente y la tierra se estima que puede ser superior a los 10 [MV]. A medida que el líder escalonado se acerca a la tierra el campo eléctrico en la superficie aumenta hasta un valor crítico (tensión disruptiva del aire) generando un movimiento de cargas ascendentes, desde los objetos ubicados en el suelo al encuentro con el líder descendente ocasionando el proceso de enlace. Este proceso termina cuando se hace contacto entre los líderes descendentes y ascendentes, después de lo cual comienza la primera descarga de retorno que sirve para neutralizar la carga del líder.

Tiempo después que la descarga de retorno impacte la base de la nube y se expanda lateralmente, esta alcanza el límite de la región de descarga de la nube, aumentando el campo eléctrico y produciendo así un nuevo drenaje de carga mediante penachos que penetran alrededor de 300 metros de la nube todavía cargada, este periodo está caracterizado por una intensa descarga corona de las gotas de agua debido a la propagación de la onda ionizante dentro de la nube.

Figura 2.

*Proceso de desarrollo rayo descendente negativo*



Nota. Adaptado de (Rakov & Uman, 2003)

### 2.3. Parámetros de las descargas atmosféricas

Para diseñar los dispositivos que serán encargados de proteger los equipos eléctricos y las vidas humanas ante las descargas atmosféricas es importante conocer los parámetros más importantes.

Este parámetro es sumamente importante para la realización de estudios de protección ante descargas eléctricas atmosféricas ya que la confiabilidad de una línea de distribución depende de su exposición ante descargas atmosféricas.

El nivel cerámico expresa el promedio anual de días con descargas eléctricas en un lugar geográfico y se expresa como  $T_d$ .

La expresión más aceptada es la propuesta por Anderson en (WC 33.01, 1991).

$$N_g = 0,04T_d^{1.25} \quad (1)$$

Donde

$N_g$  [rayos/(km<sup>2</sup> \* año)] densidad de descargas a tierra.

$T_d$  [días/año)] número de días con descargas atmosféricas al año.

La ecuación (1) es recomendada para aéreas no tropicales, sin embargo, de acuerdo con (Torres, 2003) la anterior expresión tiene errores considerables en zonas tropicales y se recomiendan las siguientes expresiones alternativas de la tabla 1.

Tabla 1.

*Expresión alternativa para la densidad de descargas a tierra en áreas tropicales*

País	Expresión alternativa a la ecuación (1)	
México	$N_g = 0,24T_d^{1.12}$	(2)
Brasil	$N_g = 0,030T_d^{1.12}$	(3)
Colombia <sup>††</sup>	$N_g = 0,00174T_d^{1.56}$	(4)

Nota. Tomado del CIGRE.

## 2.4. Características de las descargas electricas atmosfericas

### 2.4.1. Forma de onda

Las amplitudes y formas de onda de las descargas de un rayo varían estadísticamente, por esta razón se han realizado numerosas medidas sobre la base del canal con el fin de establecer una onda típica de la descarga atmosférica (ver figura 3) estableciendo los siguientes parámetros:

Tabla 2.

*Parámetros de forma onda*

Parámetro	Descripción
$I_{10}$	Intercepto del 10% a lo largo de la forma de onda de corriente
$I_{30}$	Intercepto del 30% a lo largo de la forma de onda de corriente
$I_{90}$	Intercepto del 90% a lo largo de la forma de onda de corriente
$I_{100} = I_I$	Pico inicial de corriente
$I_F$	Pico final de corriente
$T_{10/90}$	Tiempo entre los interceptos $I_{10}$ e $I_{90}$ sobre el frente de onda
$T_{30/90}$	Tiempo entre los interceptos $I_{30}$ e $I_{90}$ sobre el frente de onda
$S_{10}$	Tasa de elevación instantánea de la corriente a $I_{10}$

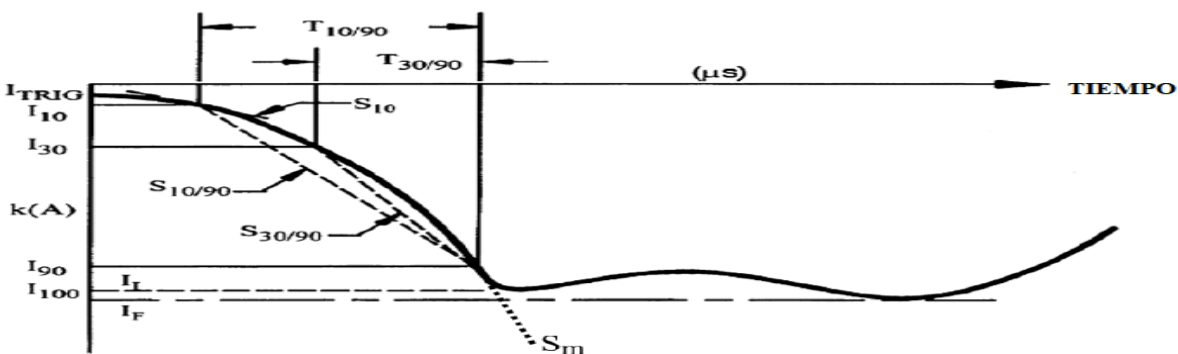
<sup>††</sup> La norma técnica colombiana NTC 4452 adopto la ecuación sugerida por Torres en Colombia.

$S_{10/90}$	Promedio de la inclinación
$S_{30/90}$	Promedio de la inclinación
$S_m$	Tasa máxima de incremento de la corriente a lo largo del frente de onda
$t_{d10/90}$	Duración del frente de onda lineal equivalente derivado de $I_F/S_{10/90}$
$t_{d30/90}$	Duración del frente de onda lineal equivalente derivado de $I_F/S_{30/90}$
$t_m$	Duración de la forma de onda lineal equivalente derivada $I_F/S_m$
$Q_1$	Carga de impulso en la forma de onda de la corriente de impacto

Nota. Tomado del Std IEEE 1410.

Figura 3.

Descripción de los parámetros de la onda de corriente.



Nota. Adaptado de (IEEE Std 1410, 2010)

#### 2.4.2. Distribución log-normal

Se han determinado que los parámetros representados en la tabla 2 deben ser evaluados estadísticamente asumiendo que siguen distribuciones logarítmicas normales como en la ecuación

(5 y 5a)

$$f(x) = \frac{1}{\beta * x * \sqrt{2\pi}} * e^{\left(\frac{-z^2}{2}\right)} \quad (5)$$

$$z = \frac{\ln\left(\frac{x}{M}\right)}{\beta} \quad (5a)$$

Donde:

$f(x)$  función densidad de probabilidad

M Valor de la mediana x

$\beta$  desviación estándar logarítmica (desviación estándar del logaritmo natural de x).

De acuerdo con los resultados en (WC 33.01, 1991) para el caso particular del pico de la primera corriente de retorno se obtienen mejores resultados si se divide la distribución en tramos con los parámetros de la tabla 4.

### 3. Metodología

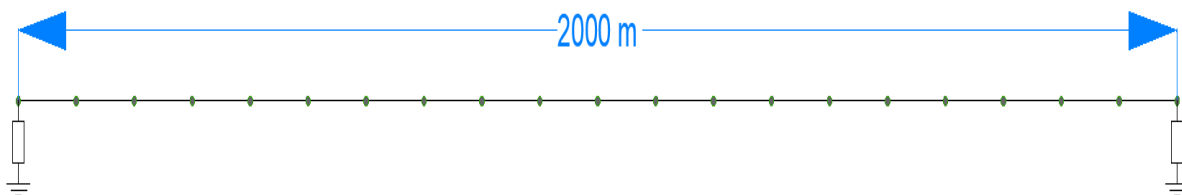
Este capítulo tiene como propósito dar a conocer cuál fue el proceso de desarrollo empleado en la simulaciones, programas utilizados y scripts generados para poder llevar a cabo la ejecución de los tres primeros objetivos planteados al inicio de esta investigación.

#### 3.1. Propuesta de ejecución.

La ejecución parte de dos configuraciones de línea de distribución, la primera en línea recta (ver figura 4) y la segunda en forma de T (ver figura 5) ambas con una longitud total de 2 km, la altura y demás parámetros de las líneas están establecidos en la tabla 3. Estas líneas no cuentan con protección alguna ante descargas de rayos y de ahora en adelante serán llamados casos base.

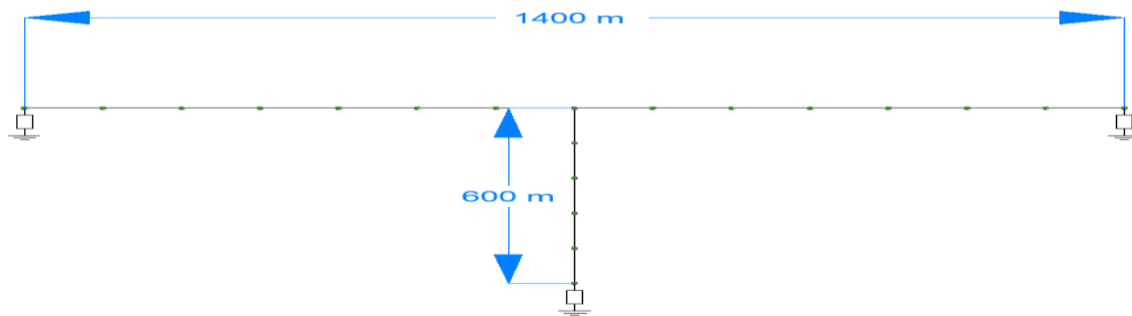
Figura 4.

*Topología línea recta caso base.*



Nota. Elaboración propia.

Figura 5.

*Topología línea en T caso base*

Nota. Elaboración propia

### 3.2. Topología y parámetros de las líneas

Los tramos de la línea de distribución simuladas serán del tipo monofásicas por simplicidad, ya que en terrenos de conductividad infinita las otras fases experimentan valores de tensiones inducidas similares. Las líneas cuentan con una longitud total de 2 kilómetros atadas con una impedancia característica conectada en sus extremos para evitar reflexiones de la onda de tensión, esta configuración asume equivalencia a una línea infinita.

Tabla 3.

*Parámetros físicos de las líneas simuladas.*

Número de conductores	Altura línea [m]	Radio [m]	Resistencia [ohm]
1	10	0.005	0

Nota. Elaboración propia

### 3.3. Tiempo de simulación de los casos de estudio.

De acuerdo con la topología establecida para cada uno de los sistemas de distribución, es fundamental estimar correctamente el tiempo de simulación y no incurrir en posibles resultados erróneos al no tener en cuenta la amplitud máxima de algunos impactos de rayos con frentes de onda amplios, es importante plantear una ecuación que tenga en cuenta el tiempo necesario que tarda en viajar la onda del rayo al nodo más lejano de línea, por esta razón se ha planteado la siguiente ecuación:

$$T_S = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{c} + T_f + 2 * \sigma \quad (6)$$

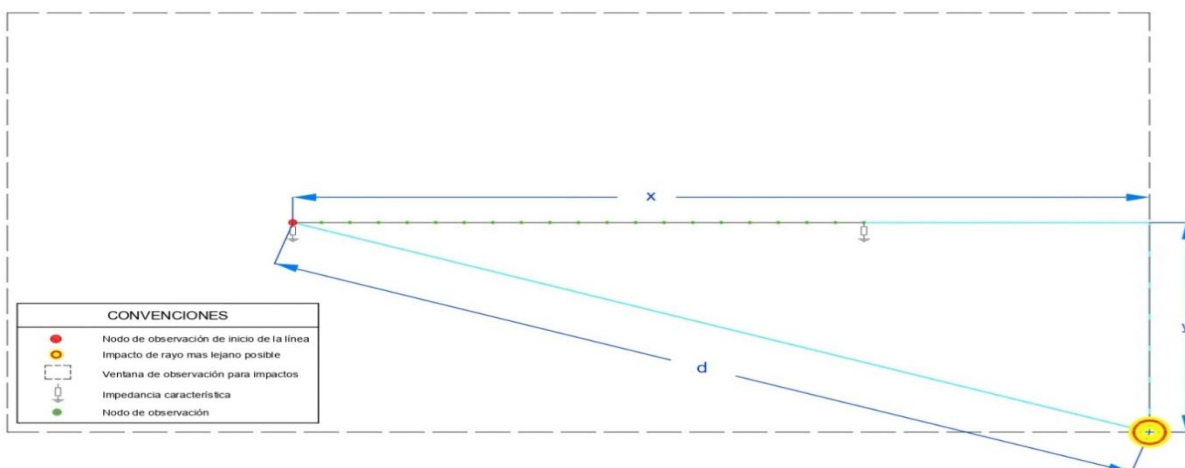
Donde  $x$  equivale a la distancia máxima horizontal desde el punto más lejano posible de impacto del rayo hasta el punto de inicio de la línea de distribución,  $y$  equivale a la distancia vertical desde el punto más lejano posible de impacto del rayo hasta el punto de inicio de la línea de distribución (Ver figura 6 y 7),  $c$  es la velocidad de la luz,  $T_f$  es el tiempo frente de la primera descarga de impacto y  $\sigma$  equivale a la desviación estándar de los parámetros de la distribución de probabilidad log-normal para la primera descarga de retorno en descargas negativas adoptados por CIGRÉ.

### 3.3.1. *Calculo del tiempo de simulación línea recta*

De acuerdo con la ecuación (6), los valores establecidos por el CIGRÉ en la tabla 4 y conociendo el área de impacto de los rayos se calcula la distancia horizontal y vertical donde se supone el impacto de un rayo el tiempo de simulación deberá ser:

$$T_S = \frac{\sqrt{(1000 \text{ m})^2 + (3000 \text{ m})^2}}{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 3.83 \mu\text{s} + 2 * (0.553 \mu\text{s}) = 15,47 \mu\text{s}$$

*Figura 6.*  
*Estimación tiempo de simulación línea recta*



Nota. Elaboración propia

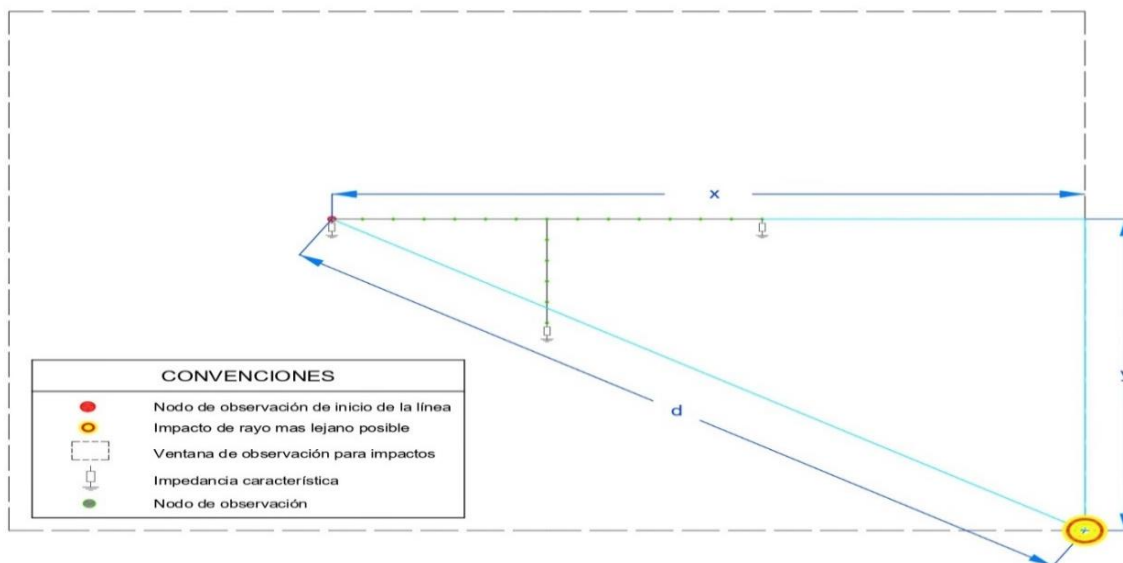
### 3.3.2. Cálculo del tiempo de simulación línea en configuración T

De acuerdo con la ecuación (6), los valores establecidos por el CIGRÉ en la tabla 4 y conociendo el área de impacto de los rayos se calcula la distancia horizontal y vertical donde se supone el impacto de un rayo el tiempo de simulación deberá ser:

$$T_s = \frac{\sqrt{(1400 \text{ m})^2 + (2400 \text{ m})^2}}{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 3.83 \mu\text{s} + 2 * (0.553 \mu\text{s}) = 14,19 \mu\text{s}$$

Figura 7.

Estimación tiempo de simulación línea en forma de T



Nota. Elaboración propia.

Al reemplazar por cada uno de los elementos en la fórmula el valor de  $T_s$  que representará el tiempo de simulación para los cálculos de impactos de rayo será aproximadamente de  $15 \mu\text{s}$  para los dos casos.

### 3.4. Método de Montecarlo

Es una técnica ampliamente utilizada para aproximar expresiones complejas y costosas de evaluar con exactitud. Consiste en simular un gran número de eventos  $n_{\text{tot}}$  que son generados aleatoriamente donde cada evento se caracteriza por los siguientes tres parámetros:

$I_p$  valor pico del primer impacto de retorno.

$t_f$  tiempo frente asociado al primer impacto de retorno.

y distancia más cercana desde el lugar del impacto hasta la línea, este parámetro tiene en cuenta las coordenadas x, y.

De acuerdo con el estándar IEEE 1410 -2010 este análisis solo tiene en cuenta la primera descarga de retorno. Los parámetros  $I_p$  y  $t_f$  encontrados en la tabla 4 que siguen la distribución de probabilidad logarítmica normal adoptada por el CIGRE e incluye un coeficiente de correlación igual a 0.47.

Tabla 4.

*Parámetros de la distribución de probabilidad log normal.*

Parámetro	Mediana		Desviación estándar	
	$I_p \leq 20$ kA.	$I_p \geq 20$ kA.	$I_p \leq 20$ kA.	$I_p \geq 20$ kA
$I_p$ (kA)	61 kA	33.3 kA	1.33	0.605
$t_f$ ( $\mu$ s)	3.83 $\mu$ s		0.553	

Nota. Valores tomados de (WC 33.01, 1991) para la primera descarga de retorno en descargas negativas adoptados por CIGRÉ.

La distancia  $y$  que se asume está distribuida uniformemente de 0 a  $y_{max}$ , este valor se escoge cuidadosamente y más allá de esta distancia se supone que ningún evento causara flameo en la línea.

Los impactos entre 0 y  $y_{min}$  son considerador como impactos directos.  $y_{min}$  es calculado haciendo uso del método de incidencia electromagnética o comúnmente conocido como método electro geométrico (Armstrong & Whitehead, 1968)

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (7)$$

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (8)$$

$$r_g = 0.9r_s \quad (9)$$

Donde

$y_{\min}$  zona vulnerable a los impactos directos.

$r_s$  distancia de impacto a la línea.

$r_g$  distancia de impacto a la tierra.

$h$  altura promedio de la línea de distribución.

Para cada impacto indirecto se calcula el valor de la tensión inducida en cada nodo de la línea por medio del software YALUK-ATP.

### 3.5. Estrategía de eliminación de casos.

Con el fin de disminuir el número de simulaciones que normalmente se deben desarrollar para tener resultados fiables se recurre a un procedimiento que reduce de manera considerable esfuerzo computacional.

#### 3.5.1. *Formula heurística de Rusck.*

Rusck obtuvo la ecuación 10 de un modelo más general propuesto por el mismo para el caso de una forma de onda escalonada de corriente por descargas eléctricas atmosféricas y una línea conductora siempre infinitamente larga con una tierra perfectamente conductora. La expresión adoptada por Rusck para calcular la tensión inducida en una línea por descargas que caen a tierra es la siguiente:

$$V_r = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left( 1 + \frac{v}{\sqrt{2 * c^2 - v^2}} \right) \quad (10)$$

Donde

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30\Omega \quad (11)$$

$I_0$  corriente del rayo

$h$  altura de la línea

$d$  distancia más cercana desde el impacto a la línea

$c$  velocidad de la luz

$v$  velocidad de la corriente de retorno

Los impactos que cumplan este criterio serán eliminados de acuerdo con  $V_r < V_c$  donde  $V_c$  es el voltaje crítico.

De acuerdo con el trabajo que está siendo actualmente desarrollado por (Soto & Perez, 2021) cuyo objetivo principal es reducir el esfuerzo computacional se debe determinar un valor para  $V_c$  típicamente bajo para que no afecte el cálculo de la tasa de falla, para este caso particular se desarrollaron las simulaciones con un  $V_r = 75 \text{ kV}$  asegurando un error relativo cercano al 0%.

### **3.6. Desempeño ante impactos indirectos de una línea de distribución.**

La tasa de falla de una línea de distribución puede ser estimada de acuerdo con el método propuesto por (Alberto Borghetti et al., 2007) el cual actualmente es el utilizado por el estándar IEEE 1410 – 2010. Básicamente se utiliza el método de Montecarlo como herramienta estadística para calcular una cantidad determinada de rayos generados aleatoriamente que son caracterizados por tres parámetros: corriente pico, tiempo frente y distancia, este método permite analizar el comportamiento de las líneas de distribución frente a los impactos de rayo a la línea, se utiliza el software YALUK DRAW (Ernesto & Soto, 2009) que permite calcular las tensiones inducidas sobre el terreno cercano a la línea.

#### **3.6.1. *Calculo tensiones inducidas.***

Para el cálculo de las tensiones inducidas se hizo uso del software YALUK DRAW<sup>‡‡</sup> que fue desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia y validado por la Universidad de Bolonia – Italia (Perez et al., n.d.).

---

<sup>‡‡</sup> Programa computacional llamado YALUK en honor al jefe de los dioses del rayo según la cultura Maya

Para realizar el cálculo de las tensiones inducidas se deben seguir los siguientes pasos:

1. Utilizar un modelo matemático para describir el canal de la descarga, puede ser el modelo de línea de transmisión (TL) o el modelo modificado de línea de transmisión (MTL).

$$i(z', t) = \exp\left(\frac{-z'}{\lambda}\right) i(0, t - \frac{-z'}{v}) \quad (12)$$

Donde

$\lambda$  constante de decaimiento, normalmente entre 1-2 km

$v$  velocidad de descarga de retorno

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} \quad (13)$$

Donde

$$\eta = e\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{1/n}\right] \text{ amplitud del factor de corrección}$$

$I_0$  amplitud de la corriente en la base del canal

$\tau_1$  constante del tiempo de frente

$\tau_2$  constante del tiempo de cola

$n$  exponente que varía entre 2 y 10

2. Calcular el campo electromagnético producido por la corriente a lo largo de la línea utilizando conductividad infinita o utilizando la aproximación de Cooray Rubinstein para conductividad finita.
3. Realizar el acople del campo electromagnético en la línea, empleando el modelo de Agrawal.

Para el caso de desarrollo se escogió el modelo de línea TL como en los estudios realizados por (Uman & McLain, 1969) y (Nucci et al., 1993)

### **3.7. Algoritmos genéticos**

Aprovechando las bondades ofrecidas por el programa de cálculo de tensiones inducidas YALUK DRAW se realizaron tres propuestas basadas en el uso de algoritmos genéticos cuyos objetivos son:

1. Haciendo uso de algoritmos genéticos encontrar la mejor ubicación sobre la línea en donde deben instalarse descargadores de sobretensión.
2. Haciendo uso de algoritmos genéticos encontrar la mejor ubicación sobre la línea en donde deben instalarse resistencias de puesta a tierra.
3. Haciendo uso de algoritmos genéticos encontrar la mejor ubicación sobre la línea en donde deben instalarse descargadores de sobretensión y resistencias de puesta a tierra.

Este módulo estadístico de YALUK DRAW desarrollado inicialmente por (De Conti et al., 2010) y modificado por los autores hace uso de una librería de algoritmos genéticos llamada UNGenetic V 2.0 desarrollada en una tesis de pregrado en la Universidad Nacional de Colombia (Delgadillo et al., 2004)

### **3.8. Planteamiento del problema**

El problema por resolver consiste en encontrar cual es la mejor ubicación de descargadores de sobretensión, sistema de puesta a tierra que serán instalados sobre las líneas de distribución objeto de estudio y luego como una combinación entre ambos métodos de protección encontrar la mejor ubicación sobre las líneas de distribución, las líneas cuentan con una separación de nodos de observación homogéneos. Este planteamiento permite disminuir las tensiones inducidas y por ende el número de salidas del sistema.

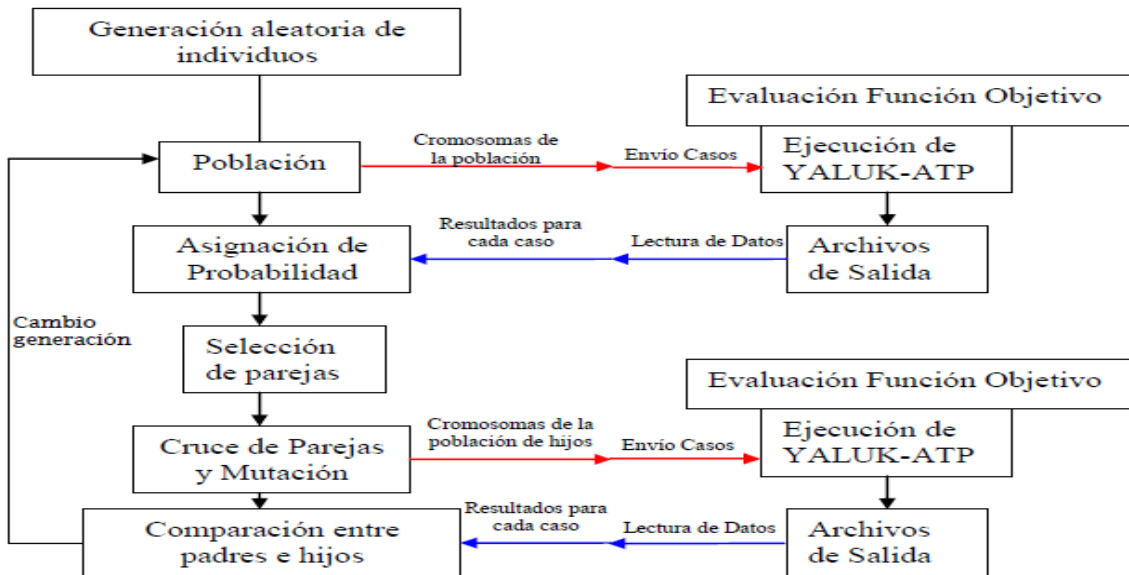
### 3.8.1. *Funcionamiento del algoritmo*

El funcionamiento del algoritmo se compone de los siguientes pasos (ver figura 8):

1. Determina las posiciones aleatoriamente para un número determinado de individuos de acuerdo con el objetivo seleccionado para:
  - a. Descargadores de sobretensión.
  - b. Resistencias de puesta a tierra.
  - c. Descargadores de sobretensión y resistencias de puesta a tierra.
2. Con la ubicación determinada de acuerdo con el objetivo establecido se modifica el archivo. ATP actualizando la ubicación para cada individuo.
3. Se ejecuta el YALUK-DRAW, en donde se calcula para cada individuo las tensiones inducidas máximas en cada nodo producidas por un número de rayos determinado. Para el desarrollo de esta investigación se simularon 5000 impactos.
4. Con las tensiones máximas para cada nodo en los diferentes casos de los impactos de rayo se evalúa la función objetivo, asignando la probabilidad de reproducción a cada individuo.
5. Se crean nuevos individuos a partir de los “padres” y nuevamente se ejecuta el programa YALUK-DRAW desde el paso (1) al paso (4) para todos los individuos.
6. Se comparan los resultados obtenidos al evaluar la función objetivo con los resultados de los individuos iniciales para escoger los mejores individuos que pasaran a la siguiente generación.
7. Este proceso se repite hasta llegar al número de generaciones determinado o cuando no haya cambios en la función objetivo por 20 generaciones.

Figura 8.

Diagrama de flujo del módulo de algoritmo genéticos y YALUK DRAW



Nota. Adaptado de. (Pérez, 2006)

### 3.8.2. Función objetivo

Para la ejecución de los objetivos propuestos en este trabajo de investigación se hará uso del programa YALUK DRAW, en el cual por medio de módulo de algoritmos genéticos realizará la optimización de los casos bases antes mencionados para los sistemas de distribución en línea recta y en forma de T.

La función objetivo está definida en dos partes, la primera parte se constituye como el promedio de los voltajes inducidos en cada uno de los nodos de observación producto de impactos directos de rayo y la segunda parte está compuesta por una relación entre el número de equipos de protección y los nodos de observación que componen la línea de distribución.

Esta función no solo tiene la finalidad de optimizar las líneas de distribución empleando una disminución de la tensión inducida sino también de disminuir el número de equipos que se usan para proteger las líneas de distribución, por esta razón se designó un porcentaje que acompañan a las dos partes de la ecuación para otorgar un nivel de importancia. El 80% equivale

a la tensión inducida producida en la línea, el 20% es equivalente a la relación entre la cantidad de equipos de protección y la cantidad de nodos de observación en la línea de distribución con el fin de representar que en la aplicación no es viable un sistema que contenga en todos sus nodos de observación equipos de protección debido a los costos que implican para una empresa, por lo anterior se decide destacar un porcentaje de prioridad en las funciones con la finalidad de estudiar influencias que tienen los dispositivos de protección ante las sobretensiones causadas por los rayos en una línea de distribución. Para los tres objetivos planteados en nuestro trabajo de investigación las funciones objetivo fueron las siguientes:

$$F. O = V_{prom} * \left( 0.8 + 0.2 \left( \frac{N_{DPS}}{N_{nodos}} \right) \right) \quad (14)$$

$$F. O = V_{prom} * \left( 0.8 + 0.2 \left( \frac{N_{SPT}}{N_{nodos}} \right) \right) \quad (15)$$

$$F. O = V_{prom} * \left( 0.8 + 0.2 \left( \frac{N_{DPS} + N_{SPT}}{2 * N_{nodos}} \right) \right) \quad (16)$$

Donde

$$V_{prom} = \left( \frac{|V_{promN1}| + |V_{promN2}| + |V_{promN3}| + \dots + |V_{promN_{nodos}}|}{N_{nodos}} \right) \quad (17)$$

$V_{prom}$  Equivale al promedio entre la suma de los voltajes inducidos producidos en cada nodo debido a los impactos indirectos de rayo.

$N_{DPS}$  es el número de descargadores de sobretensión colocados en los nodos de observación del sistema de distribución propuestos por el algoritmo genético.

$N_{SPT}$  es el número de resistencias de puestas a tierra colocados en los nodos de observación del sistema de distribución propuestos por el algoritmo genético.

$N_{nodos}$  es la cantidad de nodos de observación para la línea de distribución cada línea de distribución.

A través del planteamiento de las funciones objetivo que están basados en el valor promedio de la tensión inducida se obtendrá la cantidad optima de descargadores de sobretensión, resistencias de puesta a tierra y la combinación entre ambos elementos con el fin de disminuir la tasa de falla para los sistemas de distribución en línea recta y en forma de T.

### 3.9. Cálculo tasa de falla de la línea.

De acuerdo con el número  $n$  de eventos que superaron el nivel de aislamiento (CFO) el número de flameos anuales cada 100 km se obtiene como.

$$F_p = \frac{n}{n_{tot}} N_g A \quad (18)$$

Donde

$F_p$  número de flameos por tensiones inducidas (*descargas \* km \* año*)

$N_g$  densidad anual de descargas a tierra por descargas atmosféricas. (*descargas/km/año*)

$A$  Área total donde los impactos estuvieron concentrados. ( $km^2$ )

$n_{tot}$  número total de descargas.

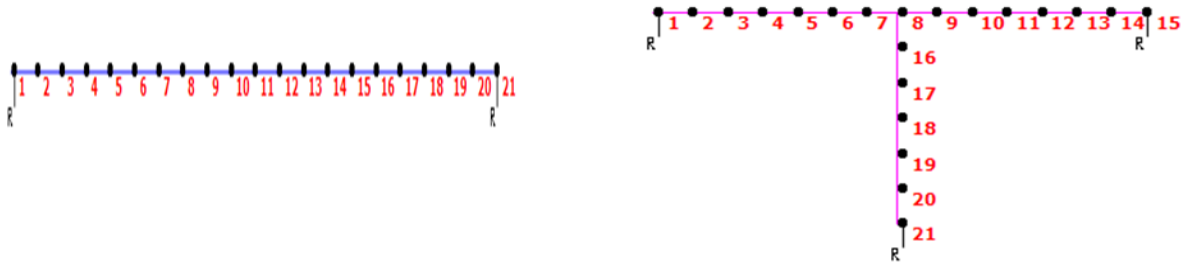
### 3.10. Desarrollo de los casos base

Para el desarrollo de los casos bases de las líneas de distribución se estimaron  $n_{tot} = 5000$  impactos simulados sobre las líneas de distribución, y un  $A = 4km^2$  para línea recta y un  $A = 8,8km^2$  para línea T debido a que no es posible aplicar simetría. De acuerdo con el método de Montecarlo se evaluará el desempeño de la línea de distribución ante impactos indirectos de rayos y estos resultados serán empleados para analizar la influencia de los descargadores de sobretensión y resistencias de puesta a tierra como los elementos de protección que inciden en la disminución de la tasa de fallas de los casos optimizados, es decir con la mejor ubicación de DPS y/o SPT.

Los datos que definirán las características de la línea recta y en forma de T fueron descritos en la primera parte de este capítulo, adicional a ello se establecerán un numero de 21 nodos de observación que compondrán la línea de distribución.

Figura 9.

*Disposición física de las líneas recta y en forma de T.*



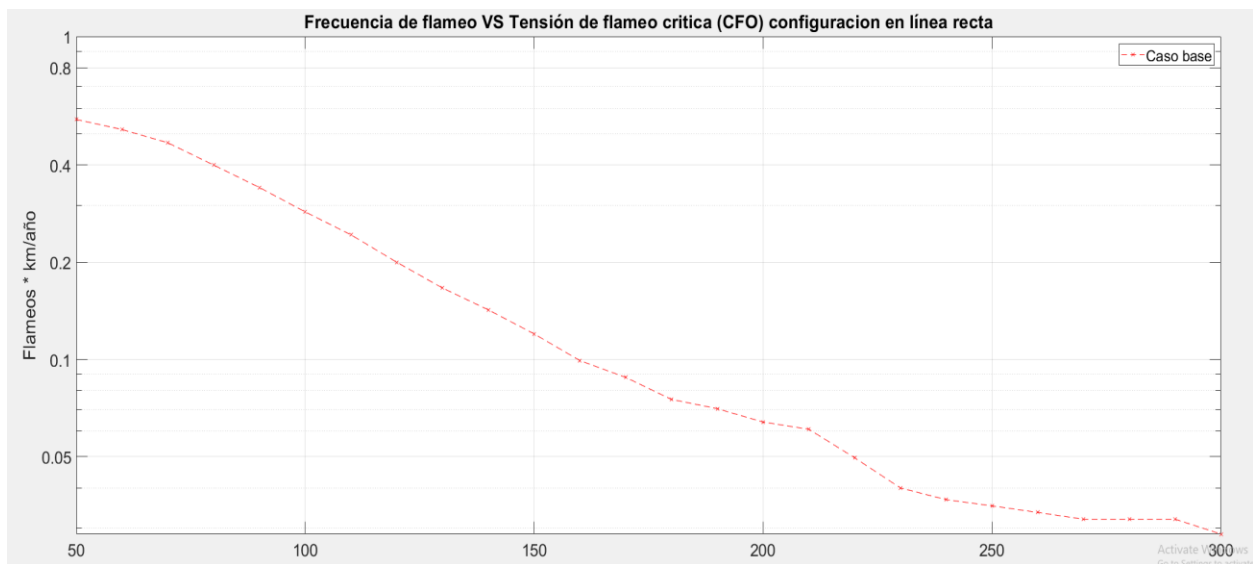
Nota. Tomado de YALUK DRAW

### 3.10.1. Desempeño línea recta caso base.

A partir de la figura 9a se calcula la tasa de falla de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 3. Se puede observar de la gráfica que para niveles de CFO bajos de 50kV hasta 150kV de se observa un decrecimiento casi lineal en flameos de la línea de distribución.

Figura 10.

*Tasa de fallas para línea recta.*



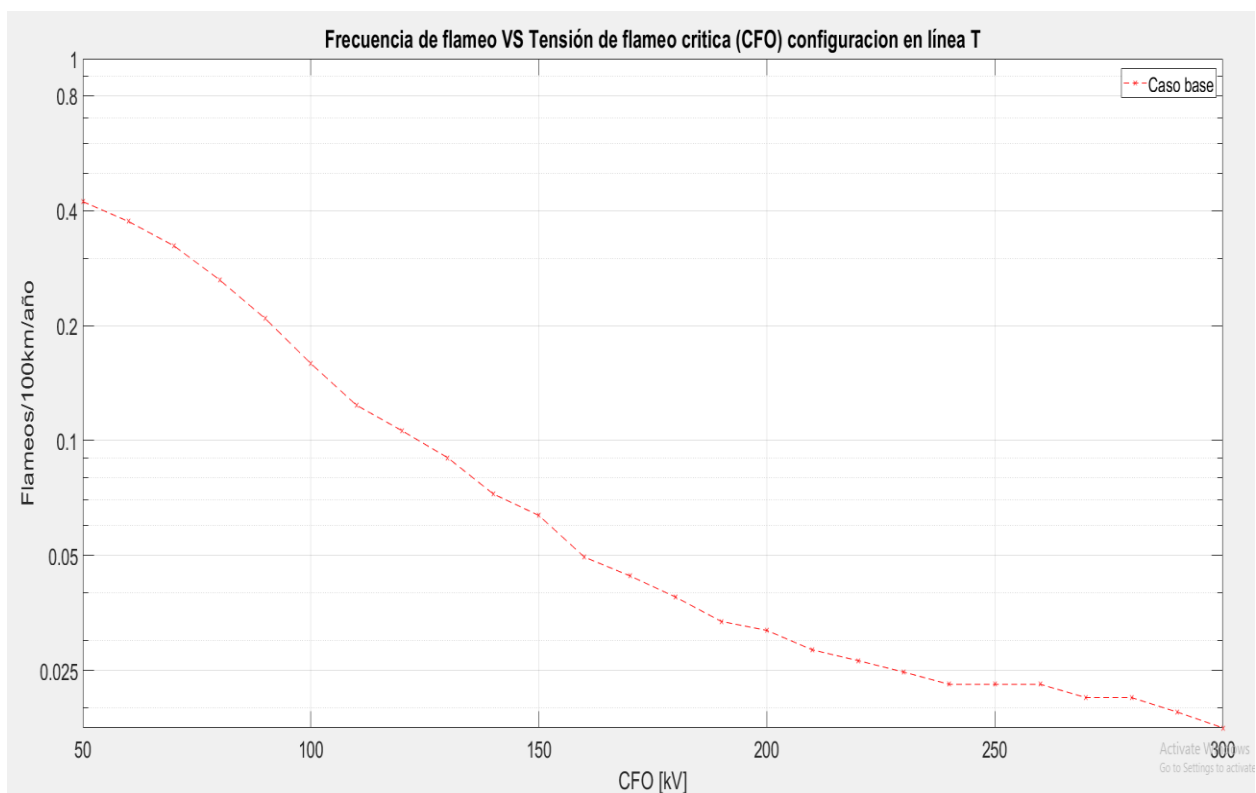
Nota. Elaboración propia

### 3.10.2. Desempeño línea en configuración T

A partir de la figura 9b se calcula la tasa de falla de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 3. Se puede observar de la gráfica que para niveles de CFO bajos como 50kV se observan aproximadamente 0.4 flameos en la línea de distribución. Las líneas complejas o con ramificaciones son menos susceptibles a sufrir fallas en el aislamiento debido a que la topología de la línea está más comprimida.

De igual forma se observa que a partir de los resultados para valores de CFO mayores a 150kV las salidas disminuyen considerablemente debido a que la probabilidad de ocurrencia de un rayo que cause tensiones inducidas de ese valor es mucho menor.

Figura 11.  
Tasa de fallas para línea en forma de T.



Nota. Elaboración propia

#### 4. Resultados optimización

##### 4.1. Optimización línea recta

De acuerdo con los resultados obtenidos del módulo de algoritmos genéticos; para la optimización del desempeño de una línea recta con un solo conductor ubicado a 10 m de altura del suelo sobre un terreno sin pérdidas se obtuvieron los resultados de la tabla 5. Estos resultados expresan la mejor ubicación sobre la línea de distribución para la protección ante impactos de rayos.

Tabla 5.

*Posición optima de dispositivos de protección en configuración línea recta.*

<b>Posición optima descargadores de sobretensión en configuración línea recta</b>																					
<b>Nodo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>
DPS	X		X		X	X		X		X	X	X	X	X		X	X	X	X		
<b>Posición optima resistencia de puesta a tierra en configuración línea recta</b>																					
SPT		X	X				X	X		X		X	X	X	X					X	X
<b>Posición Optima entre DPS y SPT en Configuración Línea Recta</b>																					
DPS	X	X		X			X	X	X	X	X	X			X	X	X				
SPT	X		X		X		X	X	X	X	X		X		X		X	X		X	X

*Fuente. Elaboración propia*

##### 4.1.1. Resultado optimización línea recta descargadores de sobretensión (DPS)

Para el método de protección con descargadores de sobretensión la Tabla 5 se expresan los nodos de observación en los cuales se encuentran la ubicación óptima de dispositivos contra sobretensiones (DPS) señalados por una “X”. De acuerdo con los resultados obtenidos en promedio cada 150 metros se ubica un descargador de sobretensión, sin embargo, en la mitad de la línea se encuentra focalizado la mayor parte de los dispositivos.

Estos resultados permiten reafirmar las investigaciones realizadas por [13] que demuestran que el desempeño de una línea de distribución ante impacto de rayos mejora siempre y cuando el espaciamiento entre descargadores por sobretensión no sea mayor a 300 metros entre ellos.

#### **4.1.2. Resultado optimización línea recta sistemas de puesta a tierra (SPT)**

Por medio de los resultados obtenidos en la tabla 5 se puede encontrar que la línea recta que fue optimizada con sistemas de puesta a tierra presenta diferencias con las ubicaciones de los DPS que están distribuidos a lo largo de toda la línea. La optimización de los SPT se puede notar como sus elementos buscan reforzar los extremos y la mitad de la línea ya que en la mitad esta la zona más expuesta debido a que en ese punto la onda se divide en dos y viaja en ambas direcciones, por lo que es más propenso a sufrir salidas en la línea debidos a flameos en estas ubicaciones. y en los extremos se busca evitar las reflexiones.

#### **4.1.3. Resultado optimización línea recta DPS y SPT**

Para una línea de distribución recta en que tiene como elementos de protección la combinación de descargadores de sobretensión y resistencias de puesta a tierras se puede notar que al no poseer ramales en su configuración se hace más susceptible a tensiones inducidas de mayor magnitud, por lo que su espaciamiento en el caso de los DPS esta distribución de la forma más homogénea posible, conservando menor o igual a los 300 m de acuerdo a lo supuesto en (A Borghetti et al., 2004) además una gran parte de los dispositivos de DPS y SPT se ubican en la mitad de la línea disminuyendo considerablemente que la amplitud de las ondas viajen por los dos extremos de la línea y también la cantidad de elementos en comparación del caso en el que se utiliza únicamente descargadores.

#### **4.2. Optimización línea en configuración T.**

De acuerdo con los resultados obtenidos del módulo de algoritmos genéticos; para la optimización del desempeño de una línea recta con un solo conductor ubicado a 10 m de altura del suelo sobre un terreno sin pérdidas se obtuvieron los resultados de la tabla 5. Estos resultados

expresan la mejor ubicación sobre la línea de distribución en configuración T para la protección ante impactos de rayos.

Tabla 6.

*Posición óptima de dispositivos de protección en configuración línea T.*

<b>Posición óptima descargadores de sobretensión en configuración línea recta</b>																					
<b>Nodo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>
DPS		X	X				X	X	X	X		X	X	X		X		X	X	X	X
<b>Posición óptima resistencia de puesta a tierra en configuración línea recta</b>																					
SPT	X			X				X	X		X	X			X	X	X			X	X
<b>Posición Óptima entre DPS y SPT en Configuración Línea Recta</b>																					
DPS				X			X	X	X	X				X		X				X	X
SPT	X	X	X			X		X	X	X		X			X	X	X	X	X		

Nota. Elaboración propia

#### **4.2.1. Resultado optimización línea en configuración T para DPS.**

Para el método de protección con descargadores de sobretensión en la tabla 6 se expresan los nodos de observación en los cuales se encuentran la ubicación más óptima de dispositivos contra sobretensiones (DPS) señalados por una “X”, A través de los resultados obtenidos se puede evidenciar que los nodos donde se presentan los mayores flameos en el sistema son en el vértice de la línea de derivación y en la línea de derivación debido a que estos nodos tienen la probabilidad de encarar las sobretensiones que pudiesen suceder en la parte baja protegiendo zonas de la línea principal, así como en los vértices, los posibles impactos en la parte superior que pudiesen producir sobretensiones en la línea de derivación esto reafirma la investigación (Alberto Borghetti et al., 2009) ya que en la misma se concluye que aquellas líneas que posean topologías complejas tienden a presentar un mejor desempeño en la tasa de falla en comparación con configuraciones básicas debido a que la línea es más compacta.

#### **4.2.2. Resultado optimización línea en configuración T para SPT.**

De acuerdo con los datos obtenidos para la posición óptima de los sistemas de puesta a tierra se observa como las protecciones tienden a estar posicionadas en los extremos y en la unión

de la derivación entre línea principal y el ramal en la parte inferior, por los resultados se evidencia que las mayores sobretensiones ocurren en los extremos y los vértices de la línea.

#### **4.2.3. Resultado optimización línea en configuración T para DPS y SPT.**

A través de los datos obtenidos para la posición óptima de los DPS en combinación con los sistemas de puesta a tierra, se puede observar que en su mayoría los DPS están ubicados en el punto entre la derivación del ramal de la línea principal y en el extremo inferior del ramal secundario con la finalidad de proteger los nodos susceptibles a salidas; como se mencionó anteriormente la derivación es propensa sufrir más sobretensiones que la línea recta principal. Por otra parte, los SPT se encuentran ubicados en los extremos de la configuración de la línea principal y en su mayoría donde no hay DPS, reforzando los nodos expuestos a sobretensiones, esta configuración obtuvo los mejores resultados ya que reparte de manera equitativa los elementos de protección en función de los nodos más susceptibles a sobretensiones.

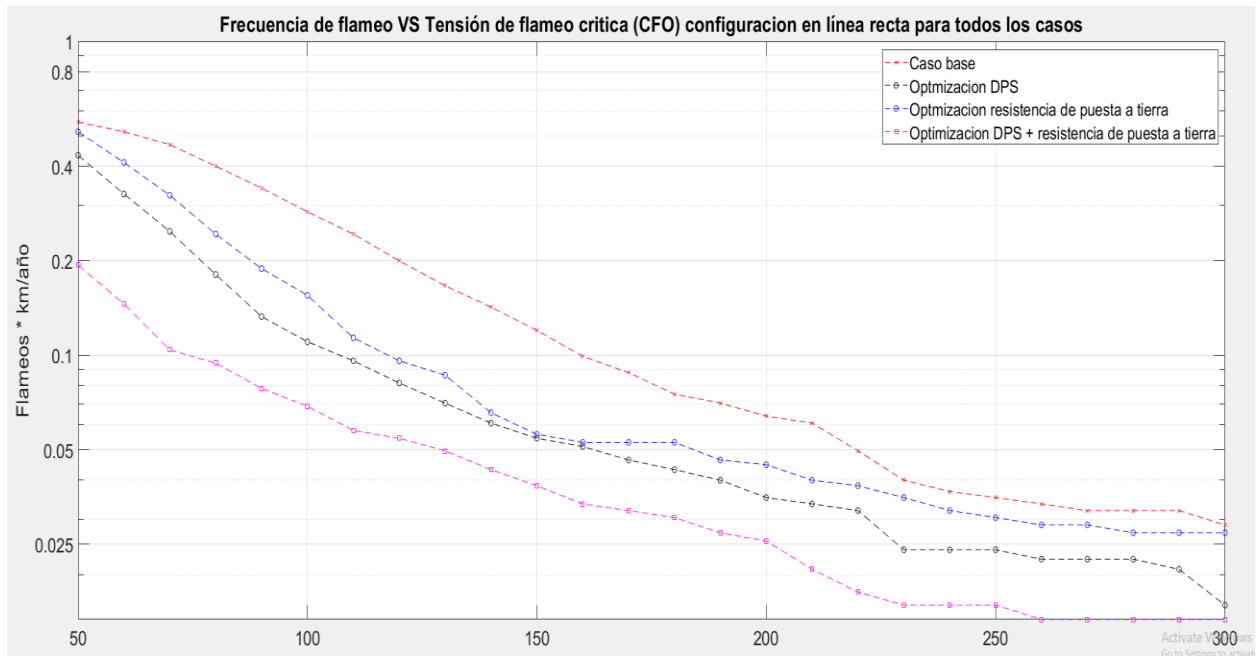
#### **4.3. Análisis de los resultados obtenidos.**

De acuerdo con los resultados obtenidos es de esperarse que la línea con menor desempeño ante impacto de rayos fuese la del caso base ya que no tiene ningún elemento que permita disminuir las tensiones inducidas en cada uno de los nodos de observación, por otra parte, la línea optimizada con resistencia de puesta a tierra presenta desempeños superiores entre CFO de 75kV y 200kV que el caso base, para CFO superiores a 200kV la diferencia ya no es significativa

Para la optimización de la línea con DPS se puede observar que es mucho mejor que el uso de las Resistencias de puesta a tierra, debido a su mecanismo de funcionamiento ante tensiones de gran magnitud

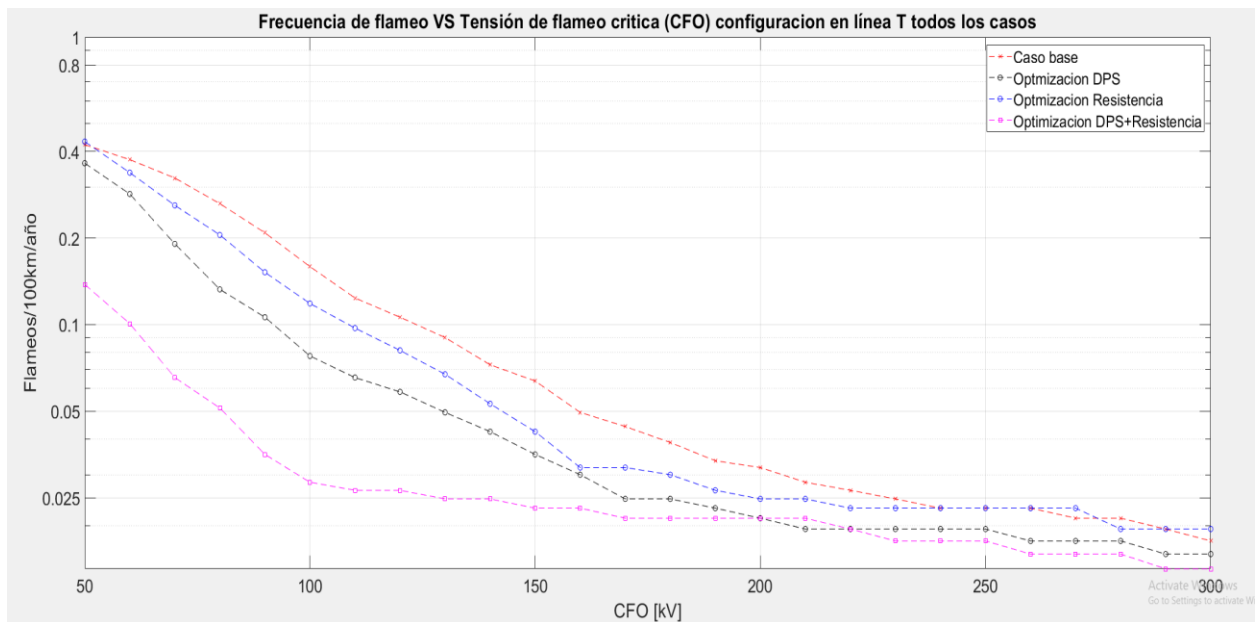
Para finalizar, la configuración óptima de DPS y SPT presenta los mejores resultados para todos los niveles de CFO esto es debido a que la línea está sobreprotegida ante impactos de rayos.

Figura 12.  
Comparativa caso base vs optimizaciones en configuración línea recta.



Nota. Elaboración propia.

Figura 13.  
Comparativa caso base vs optimizaciones en configuración línea T.



Nota. Elaboración propia.

## 5. Análisis técnico económico.

En la sección 3.9 de este proyecto de investigación se explicó cómo a partir del módulo de optimización y haciendo uso de algoritmos genéticos se minimiza el valor de la función objetivo planteada que está compuesta por el valor absoluto de los voltajes promedios en los nodos producto de las descargas atmosféricas y un número determinado de equipos de protección (DPS, SPT o una combinación de ambos) de acuerdo con el caso elegido a optimizar.

Como resultado se calculará la tensión promedio que tiene un ponderado del 80% sobre el valor total de la función objetivo y la influencia de la cantidad de equipos que protegen la línea de distribución tendrán un valor del 20% sobre la función objetivo en el caso en que los equipos sean el mismo número que los nodos de observación de la línea de distribución. Esta fórmula permite mejorar el desempeño de la línea a través de la disminución de la tasa de fallas, porque toma en consideración las tensiones inducidas, así como la cantidad y ubicación de equipos de protección que representarán la mejor solución técnica al ocurrir sobretensiones producto de descargas atmosféricas indirectas para cada caso.

A través de los resultados encontrados se pretende en este capítulo establecer la función de costos que permita representar de manera cuantitativa el costo financiero que tiene la propuesta técnica presentada en el anterior capítulo.

### 5.1.1. Función de costos.

El modelo técnico económico tiene como objetivo principal mostrar la viabilidad de la propuesta generada a partir de la optimización de los sistemas de puesta a tierra (SPT) en conjunto con los DPS (Dispositivos contra Sobretensiones) para las líneas de distribución propuestas (línea recta y en forma de T).

Para obtener una ecuación que represente la viabilidad técnico-económica de la configuración encontrada, se definió una función de costos (ver ecuación 19) la cual esta dividida en tres partes, la primera tiene en cuenta el costo de los dispositivos e instalación de los equipos de protección ya sean DPS o SPT, la segunda parte representa el manteamiento anual que se debe realizar a estos equipos y para las redes con el fin de para evitar la reducción de la vida útil del equipo y la tercera parte representa el costo que implica la salida de la línea.

Los costos de los materiales de los equipos se establecieron a partir de los precios establecidos por un canal autorizado (Ver tabla 12), los precios de la mano de obra que implican la instalación y el mantenimiento de los equipos fueron cotizados por un contratista particular

El valor de la demanda desatendida al usuario final por interrupciones en el suministro de energía o el costo que implica la salida de la línea producto de una falla que supere el aislamiento se obtuvo a través del promedio mensual del precio del kWh establecido por el mercado de energía mayorista en el mes de diciembre 2020 por la potencia que puede transmitir la línea.

$$F_c = [(\$_{DPS} * \#_{DPS}) + (\$_{SPT} * \#_{SPT})] + \left(\frac{\#_{DPS} + \#_{SPT}}{2}\right) (M_{tto}) + (M_{tto_{Redes}})] F_p + (\$_{S,E} * h) \quad (19)$$

$$\$_{S,E} = (CU_{dis}) * E \quad (20)$$

Donde

$\#_{DPS}$  representa la cantidad de DPS instalados en el sistema de distribución.

$\$_{DPS}$  equivale al precio comercial de un DPS incluyéndose dentro de este valor la mano de obra para instalación.

$\#_{SPT}$  representa la cantidad de SPT instalados en un sistema distribución.

$\$_{SPT}$  equivale al precio comercial de un SPT incluyéndose dentro de este valor la mano de obra para instalación.

Mtto equivale a los costos asociados a los materiales y mantenimiento que implican las fallas reiteradas en los elementos del sistema de distribución que provocan defectos en los DPS o SPT, este valor se representa como el 40% de un total para la instalación y mano de obra de un DPS y SPT.

$CU_{dis}$  es el precio establecido entre la suma de la generación, distribución y transmisión de 1kWh el cual no ha sido entregado a causa de una salida en el sistema provocada por un flameo.

E equivale a la energía promedio que fluye en la línea de distribución de media tensión de 11.4 kV compuesta por un cable 2 AWG con una capacidad de 96 A.

$h$  duración de la falla. Para la línea sin protección equivale a tres veces a la duración normal de 1 hora de atención de la falla.

$F_p$  es la tasa de fallas encontrada para un CFO de 150 kV.

$Mtto_{Redes}$  equivale a los costos asociados a la inspección, programación, materiales y mano de obra para la realización del mantenimiento de la línea de distribución de 2km anualmente.

Para la definición de los valores unitarios de las variables en la fórmula de análisis técnico económico es primordial establecer el material que se asumirá en la Ecuación 19 por lo que los materiales listados en la formula serán:

$\$_{DPS}$  el material asumido en la ecuación será un DPS polimérico de 30kV a 10 kA nominales.

En el caso de la variable  $\$_{SPT}$  el material asumido en la ecuación será un kit el cual está compuesto por un grupo de materiales que permiten crear un SPT, su valor unitario está compuesto por los materiales listados a continuación en la tabla 11.

Tabla 7.  
Materiales que componen un kit de SPT.

Material	Cantidad
Alambre de cobre desnudo	-
Cable de cobre desnudo	1
Conectores para varillas Cooper Weld	1
Molde GROUNDING	1
Soldadura exotérmica GROUDING	1
Varilla de puesta a tierra	1

Nota. Tomado de (Intereletricas, 2020)

## 5.2. Aplicación de la función técnico - económica a los resultados optimizados.

Una vez definidas las variables que componen la formula técnico económico, se muestran los valores unitarios de las variables para obtener el costo que supone el desarrollo de un sistema optimizado para línea recta y en forma de T.

Tabla 8.  
Valor unitario variables función técnico-económica.

Variabes	Valor Línea Recta	Valor Línea en forma de T	Magnitud
$\$_{DPS}$	447.173	447.173	[\$]
$\$_{SPT}$	197.235	197.235	[\$]
$CU_{dis}$	469,14	469,14	[\$/kW*h]
E	10.242	10.242	[kW*h]
Mtto	257.763	257.763	[\$]
$Mtto_{redes}$	400.000	400.000	[\$]

Fuente: Valores propuestos por los autores en base a la cotización brindada por un contratista.

Para la función de costos el valor del aislamiento de la línea corresponderá a un nivel de tensión de 150 kV, el valor de Mttto equivaldrá a aquellos defectos en los DPS y SPT de baja criticidad como podría ser la degradación del cable de cobre que une la puesta a tierra con los apoyos, el desprendimiento de los conectores de la varilla de cobre al cable de conexión o el cambio puntos de conexión del DPS con su respectiva mano de obra para la ejecución del mantenimiento, el valor de este mantenimiento se verá reflejado como el 40% de la suma del costo

entre la mano de obra y los materiales que son necesarios para instalar un DPS y un SPT en dos semestres.

### **5.2.1. función de costos aplicada a configuración DPS+SPT para las líneas.**

Con los valores establecidos para la ejecución de la fórmula 19, solo queda la aplicación de esta a los casos optimizados para cada caso base. A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 8 se obtendrá un total de 11 descargadores de sobretensión y 12 sistemas de puesta a tierra.

La Función de costos aplicada a la configuración DPS+SPT línea en forma de T se realiza también de acuerdo con los valores de la tabla 8, se obtuvo que la cantidad más optima después de la ejecución del software YALUK DRAW ubicando de forma aleatoria los dispositivos de protección y evaluando la función objetivo dando como resultado un total de 9 DPS y 13 elementos de SPT.

Los resultados de la función de costos se muestran en la tabla 9 para las dos configuraciones de línea que cuentan con ambos elementos de protección.

Tabla 9.  
Función de costos DPS+SPT.

Configuración línea recta	Configuración línea en forma de T
\$ 3,789,346	\$ 3,537,488

Nota. Elaboración propia.

A partir de los dos resultados obtenidos de la aplicación de la función de costos y en base a la cantidad de dispositivos de protección que surgieron producto de la optimización de las líneas de distribución para caso se pudo evidenciar que aquellos sistemas que contienen derivaciones cuando están equipados con DPS en sus vértices y extremos de derivaciones se pueden proteger las líneas con una menor cantidad de equipos lo que supondría directamente una disminución en los costos de su aplicación debido a que los nodos que carecen de protección por lo general están cubiertos con SPT.

Para el caso de la línea recta el número DPS y SPT es mayor debido a que la línea al no contener derivaciones hace que los dispositivos estén ubicados alrededor de toda la línea de distribución colocando en su mayoría descargadores de sobretensión y sistemas de puesta a tierra en los extremos y la mitad de la línea.

Sin embargo, como se puede observar en los resultados de la función de costos el número de DPS incide en mayor medida en el valor final debido a su costo material y de instalación, ya que a pesar de que los SPT son mayores en la línea en T su valor final es menor que el de la línea recta.

### 5.2.2. Soluciones alternativas para la función de costos.

A partir de los datos obtenidos se puede concluir que, si bien el uso de los DPS con SPT instalados en la línea de distribución puede mejorar el desempeño de la línea es importante conocer la viabilidad económica de las soluciones encontradas en este trabajo de investigación con el fin de comparar los valores de la función de costos, al aplicar la función a las soluciones técnicas encontradas en los dos primeros objetivos los costos serán expuestos en la tabla 10.

Tabla 10  
*Resultados alternativos de la función de costos*

Configuración de línea	Valor [€]
Caso base línea recta	\$ 9,774,515
Línea recta DPS	\$ 3,699,223
Línea recta SPT	\$ 3,465,459
Caso base línea "T"	\$ 9,751,715
Línea "T" DPS	\$ 3,538,409
Línea "T" SPT	\$ 3,409,637

Nota. Elaboración propia.

Los resultados establecen que los costos obtenidos para un tramo de línea protegido con DPS son mayores que los de un tramo que solo cuenta con SPT, esto es debido a su valor tanto material como de instalación es mayor. Por lo que se evidencia los costos que se obtienen de un sistema con DPS son muy similares a un sistema compuesto por la combinación entre DPS y SPT,

esta combinación permite mejorar el desempeño de la línea de distribución con una cantidad menor de DPS al utilizar SPT y su valor final será menor que el caso optimizado solo con DPS.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Teniendo en cuenta la necesidad de tener líneas de distribución con un buen desempeño ante impactos de rayo se desarrollaron dos herramientas computacionales que permiten realizar la optimización en la ubicación de resistencias de puesta a tierra y una combinación entre resistencia de puesta a tierra y descargadores por sobretensión en la línea con base en la tensión resultante de cada nodo. Es importante aclarar que los valores presentados son los mejores para las simulaciones realizadas, sin embargo, con mejores herramientas computacionales como lo son los supercomputadores probablemente se lleguen a mejores soluciones ya que se pueden aumentar considerablemente el número de generaciones e individuos.

El método eliminación de voltajes de Rusck permite disminuir las simulaciones en cerca de un 80% al despreciar aquellos valores que se encuentra por debajo del Voltaje crítico lo que permite la disminución en los tiempos de ejecución sin que se presenten errores considerables.

En el punto de unión de las derivaciones para un tramo principal de una línea de distribución, se comprueba que cualquier que sea su método de protección se ubicaran dispositivos en el nodo que lo compone y los más cercano al mismo, ya que son más susceptibles a salidas de la línea consecuencia en el aislamiento de la línea.

En los nodos de observación en el cual se obtuvo la combinación entre DPS y SPT se puede interpretar que en ese nodo la resistencia ha sido mejorada respecto a los nodos donde solo hay un equipo de protección.

## 7. Trabajos futuros

Se recomienda modificar los archivos fortran (.F90) que realizan la creación de los archivos (.lis) cuando se utiliza un método de eliminación de casos y el módulo de optimización ya que se generan en archivos la cantidad total de impactos y no la que superaron cierto valor crítico de tensión.

Incluir dentro del software YALUK-ATP un módulo que permita estimar el desempeño de las líneas de distribución ante impactos directos ya que de acuerdo con las simulaciones realizadas cerca del 5% al 8% de las descargas atmosféricas a tierra terminan siendo un impacto directo en la línea.

Para futuros estudios que se requiera mejorar el desempeño de una línea e implementar una cantidad mínima de dispositivos de protección, se recomienda este modelo de función objetivo realizado por los autores para que sea aplicada en condiciones más reales es decir como pueden ser conductividad infinita y terrenos no planos

**Referencias bibliográficas**

- Armstrong, H., & Whitehead, E. (1968). Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-87(1)*, 270–281. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1968.291999>
- Borghetti, A, Nucci, C. A., Paolone, M., Bernardi, M., Malgarotti, S., & Mastandrea, I. (2004). *Influence of surge arresters on the statistical evaluation of lightning performance of distribution lines*. 6.
- Borghetti, Alberto, Nucci, C. A., & Paolone, M. (2007). An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method. *IEEE Transactions on Power Delivery, 22(1)*, 684–692. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881463>
- Borghetti, Alberto, Nucci, C. A., & Paolone, M. (2009). Indirect-Lightning Performance of Overhead Distribution Networks With Complex Topology. *IEEE Transactions on Power Delivery, 24(4)*, 2206–2213. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021038>
- De Conti, A., Perez, E., Soto, E., Silveira, F. H., Visacro, S., & Torres, H. (2010). Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown. *IEEE Transactions on Power Delivery, 25(4)*, 3078–3084. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2059050>
- Delgadillo, A., Madrid, J., & Vélez, J. (2004). *Ampliación de Ugenetico: Una Librería en C++ de Algoritmos Genéticos con Codificación Híbrida*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ernesto, P., & Soto, E. (2009). *YALUK -DRAW (1.5) [C#]*. Universidad Nacional de Colombia.
- IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*. (2010). Power & Energy Society. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.5706451>

- Murillo, O. (2012). *Determinación de la relación entre descargas atmosféricas y perturbaciones de corta duración (sag y sobretensiones)* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/8567/>
- Nucci, C. A., Rachidi, F., Ianoz, M. V., & Mazzetti, C. (1993). Lightning-induced voltages on overhead lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 35(1), 75–86. <https://doi.org/10.1109/15.249398>
- Pérez, E. (2006). *AVANCES EN EL MODELAMIENTO Y EXPERIMENTACIÓN DE TENSIONES INDUCIDAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11944>
- Perez, E., Paolone, M., Borghetti, A., Nucci, C. A., Torres, H., & Rachidi, F. (n.d.). *On the comparison between experimental results and calculations of lightning-induced voltages on distribution systems – effect of the distribution network topology*. 9.
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and effects* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Soto, E., & Perez, E. (2021). *Reduction of the Number of Simulations Required to Calculate the Lightning Performance of Ramified Overhead Distribution Lines*. 5.
- Torres, H. (2002). *El rayo: Mitos, leyendas, ciencias y tecnología* (Segunda edición). UNIBIBLOS.
- Uman, M. A., & McLain, D. K. (1969). Magnetic field of lightning return stroke. *Journal of Geophysical Research*, 74(28), 6899–6910. <https://doi.org/10.1029/JC074i028p06899>
- WC 33.01. (1991). *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission line.pdf*. CIGRE.