

Influencia del Cable de Guarda en el desempeño de Líneas de distribución ante Rayos.

Juan Felipe Espinosa Martínez y Germán Fabian García Gómez

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:

Edison Andrés Soto Ríos

Doctor en Ingeniería - Línea Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Metodología	10
2. Resultados	15
3. Conclusiones	34
Referencias Bibliográficas	36

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Configuración de línea Caso 1.	16
Figura 2. a). Tensión inducida en conductores de fase Caso 1. b) Resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).	17
Figura 3. Configuración de línea caso 2.	18
Figura 4. a). Amplitud de tensión en función de la distancia a lo largo de la línea con $Rg = 10 \Omega$. b). Resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).	19
Figura 5. a). Amplitud de tensión en función de la distancia a lo largo de la línea con con $Rg = 300 \Omega$. b).Resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).	20
Figura 6. a) Tasa de Fallas de línea de distribución monofásica descrita en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007). b) Resultados Obtenidos en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007).	21
Figura 7. Vista superior de la línea y de la ubicación del trazo.	23
Figura 8. a).Tensiones inducidas en conductores de fase y cable de guarda debido a una descarga en un punto frontal del centro de la línea de distribución. b) Resultados Obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).	24
Figura 9. a). Tensiones inducidas en conductores de fase a lo largo de la línea de distribución. b) Resultados obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).	26
Figura 10. a)Tensión inducida en la fase 3 para diferentes valores de conexión a tierra Rga . b)Resultados obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).	27

Figura 11. a). Tasa de fallas de línea de distribución trifásica. b) Resultados Obtenidos en
(Tossani, y otros, 2021). 28

Figura 12. Tasa de fallas por flameo inverso en línea de distribución trifásica..... 29

Figura 13. Mapa de la densidad de descargas a tierra en el departamento de Santander. 30

Figura 14. Tasa de fallas de línea de distribución rural. 32

Figura 15. Tasa de fallas por flameo inverso en línea de distribución rural. 33

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Artículos en orden cronológico.....	10
Tabla 2. Cálculo de tasa de fallas por flameo inverso en función del CFO.....	29

Resumen

Título: Influencia del Cable de Guarda en el desempeño de Líneas de distribución ante Rayos* .

Autores: Juan Felipe Espinosa Martínez y Germán Fabian García Gómez**

Palabras Claves: Cable de guarda; Tensiones inducidas; Yaluk Draw; IEEE 1410-2010; Líneas de Distribución; Flameo; Tasa de Fallas.

Descripción

Este trabajo trata sobre el estudio del desempeño de una línea de distribución monofásica, trifásica y rural ante tensiones inducidas por el impacto directo e indirecto de rayos cuando se implementa el cable de guarda. Se utilizaron los softwares de simulación Yaluk Draw y ATP Draw teniendo en cuenta el uso del estándar IEEE 1410-2010 para el cálculo de las tensiones inducidas y el desempeño de las líneas de distribución mencionadas.

Análogamente, se realizó la validación de tres artículos (Tossani, y otros, 2021) , (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004), y (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) en los cuales se analizaron tensiones inducidas y el desempeño de las líneas de distribución al variar la separación entre puestas a tierra y sus valores correspondientes. Se demostró que para un desempeño óptimo de la línea es necesario ubicar puestas a tierra cada 200m ya que a esta distancia se lograron disminuir las tensiones hasta en un 68% en comparación con distancias mayores de puestas a tierra.

También, se realizó el diseño de una línea de distribución rural de 2 km siguiendo lo establecido por la norma de electrificación rural de la ESSA (ESSA, s.f.) y se calculó su desempeño con y sin cable de guarda. Se obtuvo una diferencia mínima en el desempeño de la línea al ubicar puestas a tierra cada 400 m (distancia mínima sugerida por ESSA (ESSA, s.f.)) en comparación con distancias de aterrizaje cada 200 m para valores de CFO entre 50 y 300 kV.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director: Edison Andrés Soto Ríos

Abstract

Title: Influence of the Ground Wire on the lightning Performance of Distribution Lines*.

Authors: Juan Felipe Espinosa Martínez y Germán Fabian García Gómez**

Keywords: Shielding wire; induced voltage; Yaluk Draw; IEEE 1410-2010; Distribution Line;

Flashover; Line Flashover Rate

Description

This project deals with the study of the performance of a single-phase, three-phase and rural distribution line against induced voltages by the direct and indirect impact of lightning when the wire cable is implemented. Similarly, the Yaluk Draw and ATP Draw simulation software were used taking into account the use of the IEEE 1410-2010 standard for the calculation of the induced voltages and the performance of the aforementioned distribution lines.

The validation of three articles (Tossani, y otros, 2021), (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004), and (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) was carried out in which induced voltages and the performance of the distribution lines when the separation between groundings and the ground resistance are varied. It will be shown that for optimal performance of the line it is necessary to locate the grounding every 200m since at this distance the voltages will be reduced by up to 68% compared to greater grounding distances.

Also, the design of a 2 km rural distribution line was carried out following the provisions of the ESSA rural electrification standard (ESSA, s.f.) to study the performance of the line, implementing the wire cable. It was found that locating grounding every 400 m (minimum distance suggested by ESSA (ESSA, s.f.)) compared to landing distances every 200 m for CFO values between 50 and 300 kV had a slow difference.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director: Edison Andrés Soto Ríos

Introducción

Las perturbaciones electromagnéticas debido a tensiones inducidas por rayos que impactan directa e indirectamente en las líneas de distribución eléctrica son las responsables de la mayoría de las fallas en el suministro de la energía, las cuales provocan micro interrupciones y, en general, perturbaciones en dispositivos electrónicos sensibles (Tossani, y otros, 2021). Algunos estudios estiman que los rayos son los causantes del 50% de las perturbaciones electromagnéticas que afectan el funcionamiento de los sistemas de distribución de energía eléctrica y entre el 70 y el 80% de todos los problemas de la calidad de energía eléctrica (Gómez & Morcos, 2002).

Las sobretensiones generadas por el impacto de dichos fenómenos pueden destruir circuitos eléctricos por completo y degradar las partes aislantes de los conductores siendo necesario en la mayoría de los casos su reposición completa. Todos los efectos que se producen como consecuencia de las tensiones inducidas conllevan de alguna manera pérdidas económicas, ya sea por el valor de los equipos deteriorados o por los costes directos e indirectos que se derivan de las paradas de producción.

Ahora bien, los estudios realizados en este campo han aportado diferentes formas de contrarrestar dichas tensiones como se muestra en el artículo (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004), en este trabajo se analizó desempeño del cable de guarda, puestas a tierra y pararrayos ante las tensiones inducidas provocadas por impactos de rayos. La metodología desarrollada en el artículo (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) verificó la tasa de fallas que se produce en una línea de distribución que cuenta con la presencia de cable de guarda utilizando el modelo de LIOV - MC. Así mismo, la investigación que se desarrolló en (Tossani, y otros, 2021),

se analizó el desempeño de una línea de distribución ante impactos directos e indirectos al implementar el cable de guarda como estrategia de mitigación de tensiones inducidas en condiciones de terreno no ideales.

Análogamente, en este trabajo de investigación se realiza un riguroso estudio de simulaciones hechas mediante el uso del software Yaluk Draw® (Scientific Figure on ResearchGate, s.f.) el cual se basa en el método de Monte Carlo (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) generando impactos aleatorios de rayos implementando la norma IEEE 1410-2010 (IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, 2011) para realizar el análisis del desempeño de líneas de distribución monofásicas y trifásicas.

Adicionalmente, teniendo como guía la norma de electrificación rural de la ESSA (ESSA, s.f.) se diseñó una línea de distribución de energía eléctrica trifásica, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: cantidad de rayos por área, tipos de conductores, cables a utilizar, longitud de línea y distancias de puestas a tierra.

Con la finalidad de proteger las líneas de distribución de energía eléctrica y disminuir notablemente sus micro interrupciones, se pretende con este estudio implementar el uso de cable de guarda para mejorar la calidad de la energía que se está suministrando a través de la línea y de esta manera ayudar a proteger los dispositivos electrónicos sensibles.

Este documento está dividido en cuatro secciones: la primera sección donde se realiza la introducción al problema a tratar, la segunda es la sección que corresponda a la metodología en donde se evidencia la forma en que se desarrollara cada fase de la investigación, la tercera sección hace referencia al análisis de los resultados obtenidos y finalmente la sección que concierne a las conclusiones de este estudio.

1. Metodología

A cerca del estudio de tensiones inducidas por impactos indirectos de rayos en líneas de distribución eléctrica se implementaron softwares con el fin de generar y ejecutar la simulación de fenómenos de descargas eléctricas. Este trabajo de investigación contó con 4 fases para su elaboración.

Fase 1. Recopilación bibliográfica.

Para empezar, se realizó una búsqueda intensiva de información bibliográfica que estuviera directamente ligada con el estudio de impactos de rayos en líneas de distribución de la cual se hizo un análisis de artículos que implementaran el cable de guarda o métodos para mitigar las sobretensiones que producían dichos fenómenos eléctricos. En la tabla 1 se evidenciaron los artículos en orden cronológico que tuvieron una mayor influencia en el estudio de este trabajo.

Tabla 1.

Artículos en orden cronológico

Artículo de investigación	Año
Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems	1984
Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium Voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding wires and of surge arresters: modeling and experimental validation	2004

Artículo de investigación	Año
An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method	2007
Influencia de los sistemas de puesta a tierra descritos en el estándar IEEE 1243 en la tasa de fallas por rayos de líneas de transmisión.	2020
Influence of the presence of grounded wires on the lightning performance of a medium-voltage line	2021
Yaluk Draw: software especializado para análisis del desempeño de líneas de distribución ante impacto de rayos	2022
Use of Rusck formula and Multi-nonlinear Regression to Discard Events Required to Calculate the Lightning Performance of Overhead Lines.	2022

Fase 2. Cálculo de tensiones inducidas y tasa de fallas de impactos indirectos.

Continuando con el estudio del desempeño de las líneas de distribución eléctricas ante rayos, se eligieron 2 artículos en los cuales se implementaron el cable de guarda como medida de protección ante las tensiones inducidas que se generaban por impactos indirectos a la línea de análisis. Para esto, se utilizó el programa de simulación Yaluk Draw® (Scientific Figure on ResearchGate, s.f.), este software está directamente vinculado con ATPDraw, el cual permite el uso de sus librerías de elementos eléctricos y modelos matriciales que facilitan el estudio del fenómeno de inducción electromagnética del rayo en las líneas de distribución eléctrica.

Se simularon 10.000 impactos de rayos generados aleatoriamente, caracterizados por tres parámetros, la corriente pico I_p , el tiempo de frente t_f y la distancia desde la línea "y". Yaluk Draw® (Scientific Figure on ResearchGate, s.f.), usó una función de Heidler (Heidler, Cvetic, & Stanic, 1999) para describir la corriente en la base del canal. Otro parámetro que se debe tener en cuenta para este estudio es el y_{max} el cual se escogió cuidadosamente para tener en cuenta todos

los impactos indirectos que exceden el CFO de la línea de distribución. En ese orden de ideas, Con n el número de eventos que generan tensiones inducidas mayores que el nivel de aislamiento (el CFO multiplicado por un factor de 1.5 o 1.2 (De Conti, y otros, 2010)) y N_g la densidad de fallas a tierra anuales, el índice de fallas por 100 km de las líneas de distribución a F_p que se analizó, está dado por:

$$F_p = 200 \frac{n}{n_{tot}} N_g y_{max} \quad (1)$$

Donde:

N_g Es la densidad anual de impactos a tierra.

n Es el número de eventos que producen voltajes inducidos mayores que el nivel de aislamiento de la línea.

n_{tot} Es el número total de eventos generados.

y_{max} Es el máximo valor de distancia en el cual el efecto de tensión inducida es considerable.

Ahora bien, para el cálculo de las tensiones inducidas el software realizó los siguientes pasos: Para empezar, se hizo una descripción del canal de la descarga eléctrica a partir de un modelo matemático, utilizando el modelo de línea de transmisión TL. Posteriormente se calculó el campo electromagnético implementando las ecuaciones analíticas para conductividad finita e infinita según Master y Uman (Master & Uman, 1983), utilizando la corriente obtenida con la ecuación (2). Por último, se utilizó el modelo de Agrawal (Agrawal, Price, & Gurbaxani, 1980) para múltiples conductores y conductividad finita.

La ecuación utilizada para describir la corriente en la base del canal fue:

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} \quad (2)$$

Donde:

$\eta = e^{[-(\frac{\tau_1}{\tau_2})(n\frac{\tau_1}{\tau_2})^{\frac{1}{n}}]}$, es la amplitud del factor de corrección.

I_0 Es la amplitud de la corriente en la base del canal.

τ_1 Es la constante del tiempo de frente.

$$\tau_1 = \left(\frac{t_f^{n+1}}{n\tau_2} \right)^{\frac{1}{n}}$$

τ_2 Constante asociada al tiempo de cola.

η Es un exponente que varía entre 2 y 10.

Por último, se usó el software Yaluk Draw® (Scientific Figure on ResearchGate, s.f.) y ATPDraw para calcular el desempeño de una línea de distribución eléctrica de tipo rural, siguiendo la normativa ESSA (ESSA, s.f.) para el diseño adecuado de la línea y el uso del cable de guarda.

Fase 3. Cálculo de tasa de fallas ante impactos directos.

Se implementó el software ATPDraw para el cálculo del desempeño de las líneas de distribución rural y trifásica ante impactos directos, en el cual se introdujeron los mismos datos de configuración de línea en (Tossani, y otros, 2021) que contó con cable de guarda, se analizó el comportamiento de las sobretensiones inducidas en la línea y la tasa de fallas por flameo inverso (BFR).

$$BFR = 0.6 \cdot NI \cdot P(Ic) \quad (3)$$

Donde:

NI Es la cantidad de rayos que impactan la estructura (impactos/100km/año)

$P(Ic)$ Es la probabilidad de que la corriente crítica sea excedida.

$$Nl = Ng * \left(\frac{28 \cdot h^{0.6} + Sg}{10} \right) \quad (4)$$

Donde:

Ng Es la densidad de descargas a tierra por unidad de superficie en un cierto lugar geográfico en unidades de rayos/ km²/año.

h Es la altura de la torre en metros.

Sg Es la distancia entre cables de guarda en metros.

$$P(Ic) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Ic}{31} \right)^{2.6}} \quad (5)$$

Donde:

Ic Es la corriente crítica a la cual hay falla (la tensión en la torre supera el nivel de aislamiento) en unidades de kA.

Fase 4. Análisis de resultados y elaboración de informe final

En esta última fase a partir de los resultados obtenidos en cada una de las fases previamente mencionadas, se procedió a realizar un minucioso análisis de como el cable de guarda funcionó para mitigar las tensiones inducidas que alteraban notablemente el desempeño de las líneas de distribución eléctricas monofásicas, trifásicas, rurales y se elaboró un informe detallado de acuerdo con lo obtenido en cada simulación.

2. Resultados

a. Caso 1

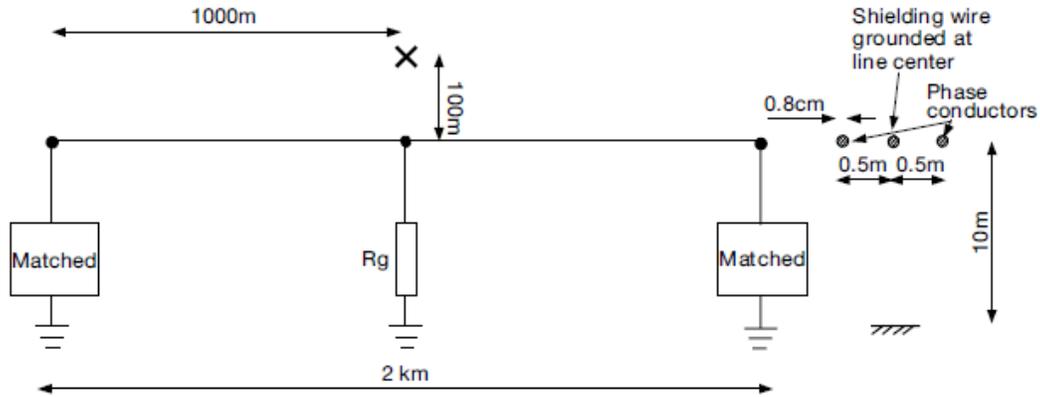
Para el primer caso de estudio, se compararon los resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004), en el cual se analizó la tensión inducida en un conductor de fase y su desempeño al contar con cable de guarda puesto a tierra con diferentes valores de resistencia (R_g), de esta manera, se estableció una relación entre el valor de resistencia y la capacidad que tiene el cable de atenuar el efecto de sobretensión sobre los conductores de fase.

La configuración de la Figura 1 presentó una línea trifilar de 2 km la cual está compuesta por dos conductores de fase ubicados a una altura de 10 m y separados a una distancia de 1 m entre ellos. Los conductores cuentan con los mismos parámetros característicos ($r=0.004$ m y $R_c=0.5 \Omega$) y se encuentran ubicados en los extremos. El tipo de onda de rayo que se utilizó fue tipo doble Heidler con una velocidad de descarga de retorno de $1.2 \times (10)^8$ m/s y con modelo de corriente de retorno TL.

De igual forma que en las estructuras, el cable de guarda se encuentra puesto a tierra en el centro de la línea, posición en la que se analizaron los efectos de una descarga eléctrica producida a una distancia de 100 m de la línea (marcación “x” en la Figura 1). Seguidamente, se estudió la influencia de R_g para 3 valores de resistencia (100, 500, 900) Ω , a partir de los cuales se obtuvieron los resultados necesarios para comparar el comportamiento de tensiones inducidas en los conductores de fase obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).

Figura 1.

Configuración de línea Caso 1.

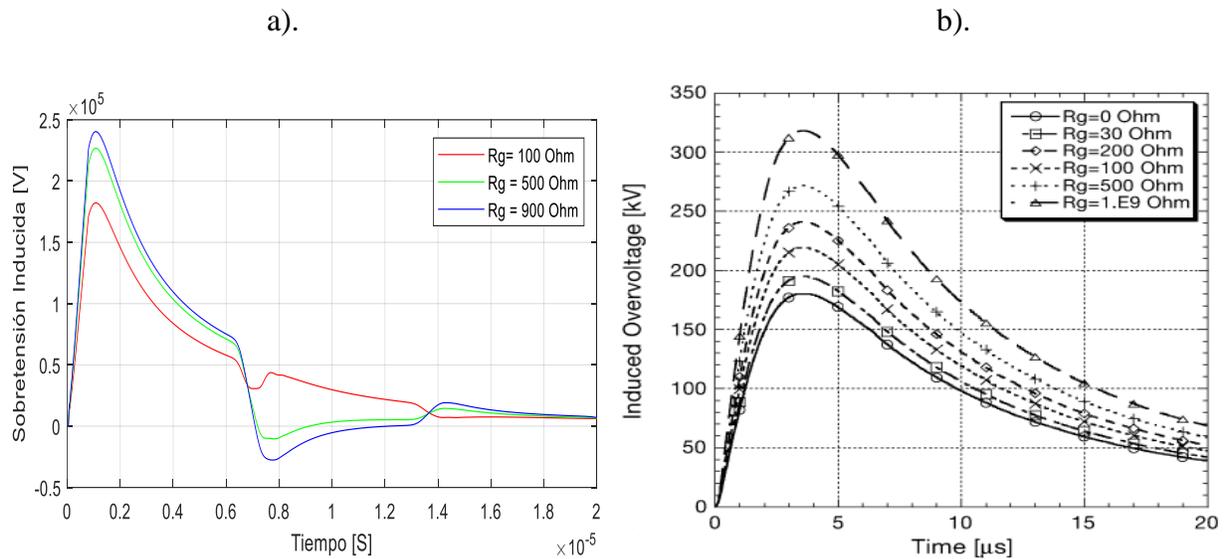


Nota. Tomado de (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).

En los resultados obtenidos en la Figura 2, se analizaron valores pico de 182.2 kV para 100 Ω y 226.8 kV para 500 Ω en comparación con los obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004) obteniendo una disminución de 17.1% para R_g de 100 Ω y 17.5% para R_g de 500 Ω . Esta diferencia es debida a que el tipo de onda de rayo que utilizaron en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004) fue de tipo trapezoidal en comparación con la de este trabajo de investigación. Por otra parte, se analizó que aumentar el valor de resistencia está directamente relacionado con el incremento de las tensiones inducidas.

Figura 2.

a). Tensión inducida en conductores de fase Caso 1. b) Resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).

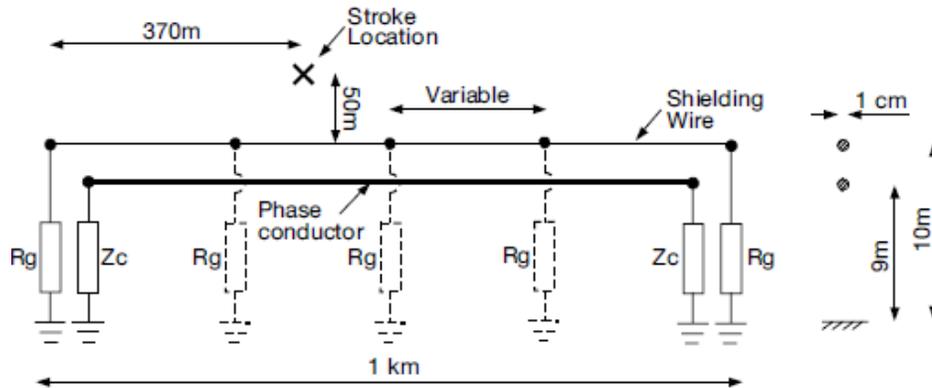


b. Caso 2

Análogamente en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004), se analizaron las sobretensiones producidas en diferentes puntos de la línea de distribución eléctrica la cual está conformada con un conductor de fase y un cable de guarda ubicados a una distancia de 9 m y 10 m, los conductores cuentan con 1 cm de diámetro. Se produjo una descarga en un punto a una distancia horizontal del extremo izquierdo de la línea a 370 m y 50 m enfrente de esta (marcación “x” en la Figura 3). En este estudio se varió la distancia a la cual el cable de guarda está siendo puesto a tierra, los valores de R_g (10 y 300) Ω en un terreno con una conductividad de 1 mS/m.

Figura 3.

Configuración de línea caso 2.



Nota. Tomado de (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).

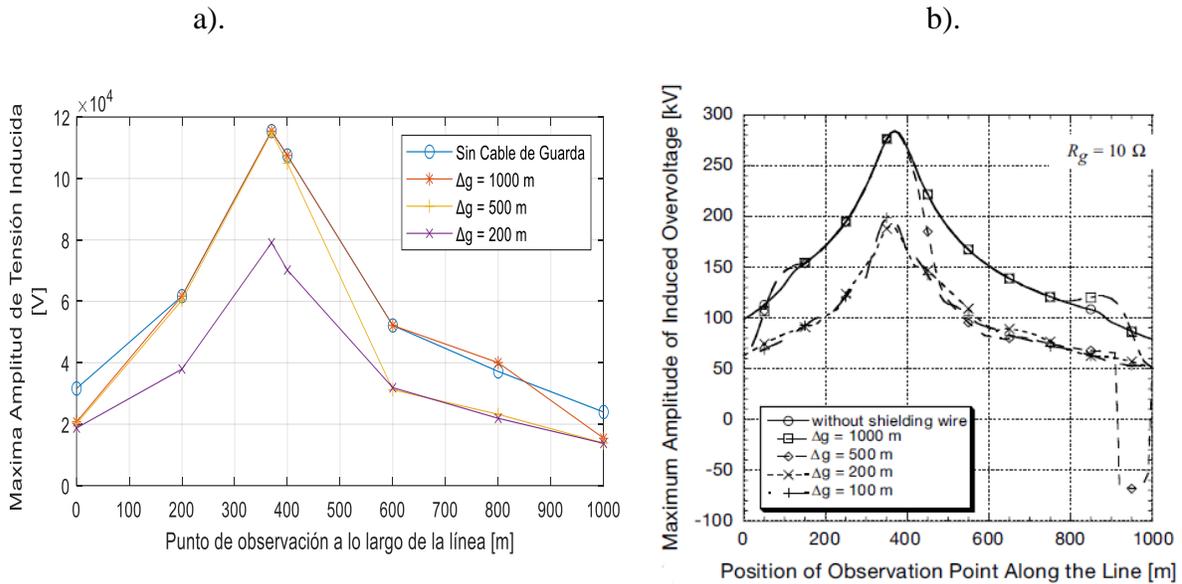
Adicionalmente, se plantearon escenarios en los cuales no se implementó el cable de guarda, y se variaron las distancias de puestas a tierra entre 200, 500 y 1000 m en las cuales se analizó el efecto que tienen para mitigar el impacto de las tensiones inducidas a lo largo de la línea.

En la Figura 4, se obtuvieron resultados de tensión pico en función de la distancia a lo largo de la línea. Al aumentar los distanciamientos de puestas a tierra, se evidenció que entre colocar puestas a tierra cada 200m y cada 1000 m la sobretensión aumento un 68%, esto se debió a que el tiempo de duración de la corriente en la línea fue mayor debido a los impactos de rayos.

Figura 4.

a). Amplitud de tensión en función de la distancia a lo largo de la línea con $R_g = 10 \Omega$. b).

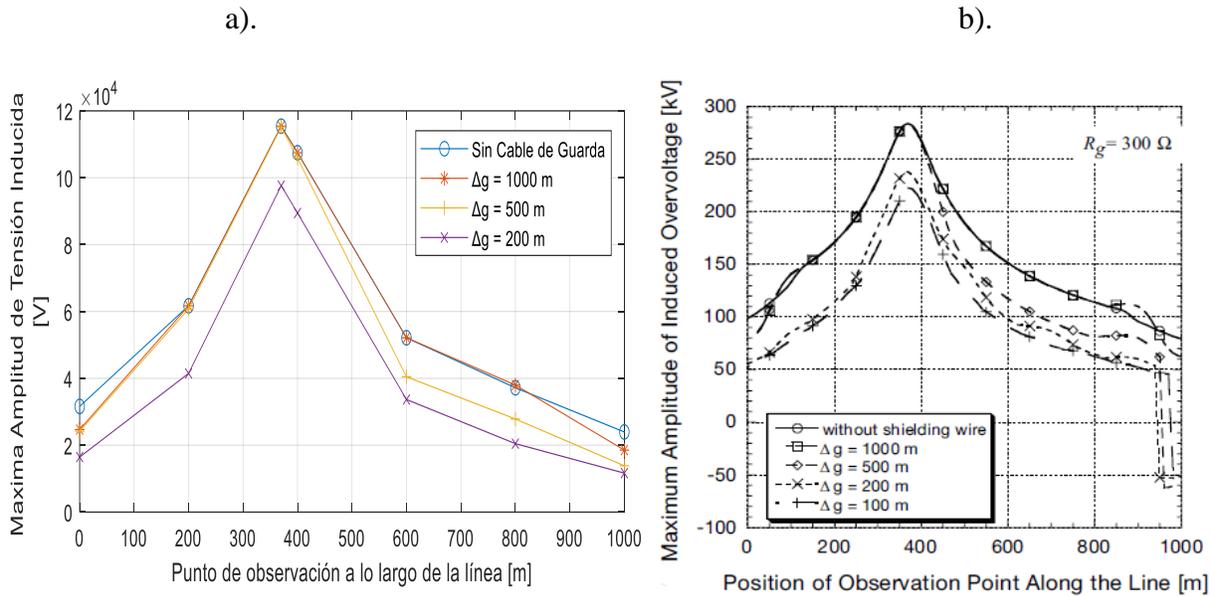
Resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).



En los valores obtenidos en la Figura 5 se analizó el efecto del cambio de R_g para el estudio de la tensión teniendo en cuenta las mismas distancias de puestas a tierra en la Figura 4. Debido a que, al implementar más puestas a tierra separadas entre sí a distancias más cortas, generó caminos por donde la corriente se irá a disiparse a tierra más rápido y por lo tanto la tensión inducida será menor. Por ejemplo, se evidenció una disminución del 15% de la tensión máxima inducida al implementar puestas a tierra cada 200 m.

Figura 5.

- a). Amplitud de ensión en función de la distancia a lo largo de la línea con $R_g = 300 \Omega$.
 b). Resultados obtenidos en (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004).



c. Caso 3.

Para este último caso de estudio, se presentó un modelo de línea monofásica de 2 km con conductores de 1 cm de diámetro, compuesta por un conductor de fase a una altura de 10 m y su correspondiente cable de guarda a 1.63 m por debajo como se propuso en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007). Se realizó el análisis de la tasa de fallas que se produce en una línea de distribución eléctrica que cuenta con la presencia de cable de guarda.

La línea en estudio se simuló en el software Yaluk Draw® (Scientific Figure on ResearchGate, s.f.) para obtener la tasa de fallas en un terreno con condiciones ideales ($R_g=0$ y $\sigma = \infty$) y otro para condiciones de conductividad no finita ($R_g=100 \Omega$ y $\sigma = 1$ mS/m). La línea de distribución cuenta con puntos de aterrizaje del cable de guarda ubicados cada 200 m.

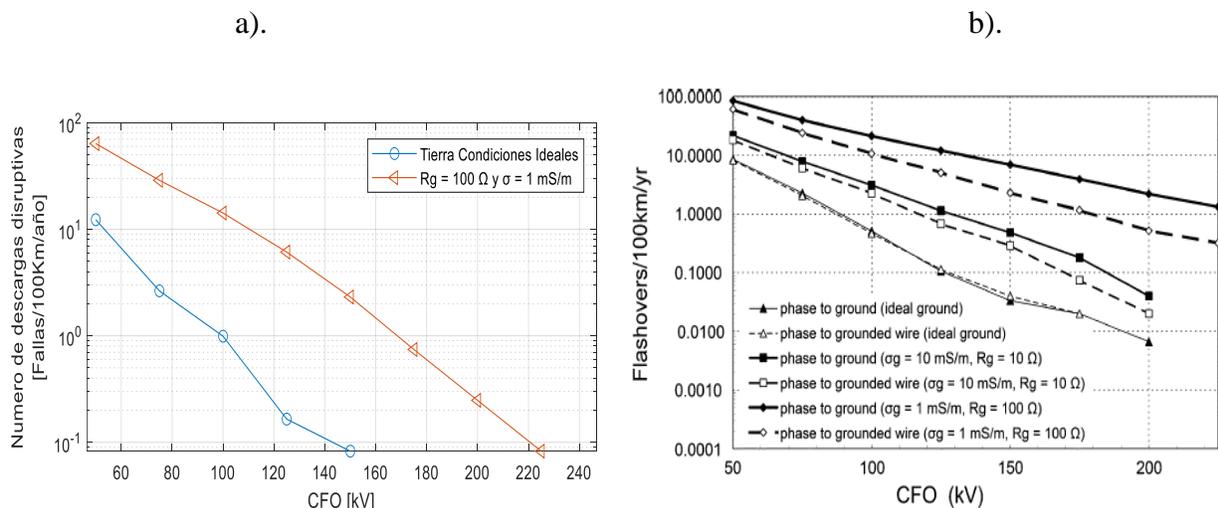
Para el análisis de la tasa de fallas se consideraron 10000 eventos de impactos de rayos para el estudio del desempeño de la línea de distribución. Se simuló impactos solo en un cuarto del área alrededor de la línea (franja superior derecha) considerando la simetría existente (Soto Rios, Perez, & Del Rio Trujillo, 2021).

De los resultados obtenidos en la Figura 6 se analizó para un valor de CFO de línea igual a 125 kV en condiciones ideales de terreno, el número de descargas que pueden producir flameo es igual a 0.1651 Fallas/km² · año. Por otra parte, en condiciones de terreno con conductividad finita, se evidenció un incremento notable llegando a obtenerse una cantidad de 6.108 Fallas/km² · año.

Para valores de CFO mayores a 150 kV en terrenos con condiciones ideales el número de flameos es despreciable. Por el contrario, en terrenos con condiciones no ideales se consideran flameos de hasta 225 kV de CFO.

Figura 6.

a) Tasa de Fallas de línea de distribución monofásica descrita en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007). b) Resultados Obtenidos en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007).



El comportamiento de la tasa de fallas obtenido para el caso de contar con condiciones ideales presenta gran similitud en los resultados obtenidos en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007). Sin embargo, para el caso de terrenos no ideales los resultados permitieron comparar el análisis de la tasa de fallas en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) para valores menores a CFOs de 150 kV. Esta diferencia se debe a que en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) se simularon 120000 impactos de rayos.

d. Desempeño de una línea de distribución ante descargas directas e indirectas

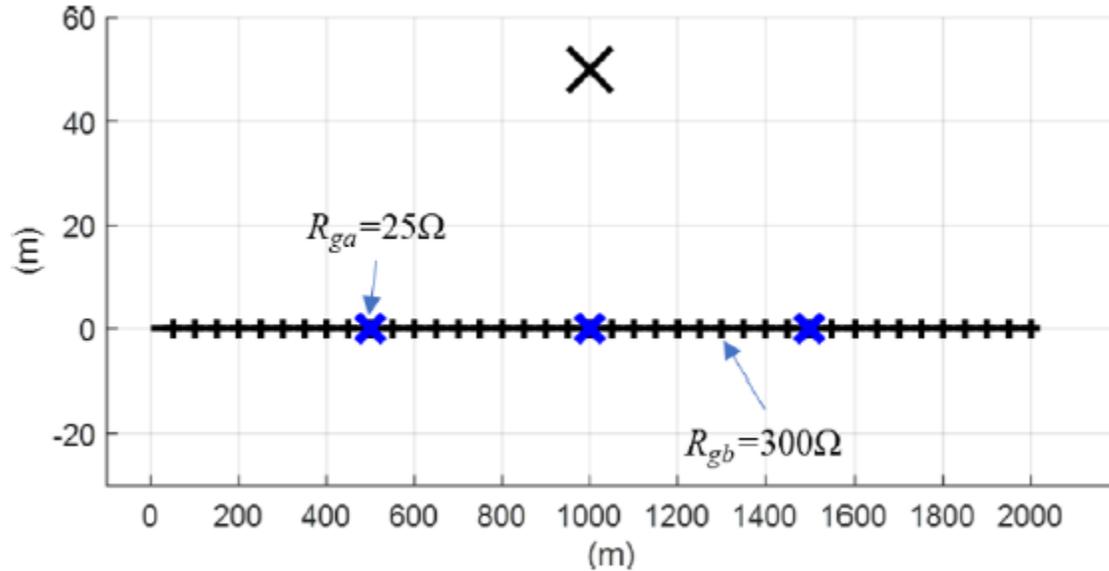
En esta sección se propone el estudio del desempeño de una línea de distribución trifásica ante el impacto de rayos directos e indirectos teniendo como referencia los resultados obtenidos en (Tossani, y otros, 2021). Se verificó la influencia de los impactos (directos e indirectos) en el cable de guarda y en los conductores de fase.

Así mismo, en (Tossani, y otros, 2021) se desarrolló un análisis en el cual se simula una descarga en un punto frontal ubicado a 50 m del centro de la línea. Posteriormente, se analizó el efecto de la tensión inducida sobre los conductores de fase y en el cable de guarda.

En la Figura 7 se muestra una línea trifásica de distribución eléctrica de 2 km de longitud con un cable de guarda, el cual está ubicado a una posición $y_1=0$ m (centro de la torre), a una altura de 14.6 m y se encuentra puesto a tierra cada 50 m de la línea de distribución. También, la línea se encuentra puesta a tierra con dos diferentes valores de resistencias R_{ga} de 25 Ω para distancias de 500, 1000, 1500m (puntos azules) y R_{gb} de 300 Ω para el resto de los puntos.

Figura 7.

Vista superior de la línea y de la ubicación del trazo.



Nota. Tomado de (Tossani, y otros, 2021).

La ubicación de los conductores de fase no es simétrica, es decir, se encuentran en posiciones relativas (respecto al centro de la torre) $y_1 = -0.5\text{m}$, $y_2 = 0.5\text{m}$ y $y_3 = 1\text{m}$ para las fases 1, 2 y 3 respectivamente a una altura de 13 m.

El estudio de las sobretensiones propuesto en (Tossani, y otros, 2021) realizó un análisis en el dominio del tiempo de las tensiones inducidas en los conductores de fase y el cable de guarda debido a una descarga como se muestra en la Figura 7. Estableciendo un tiempo de simulación necesario de $10\ \mu\text{s}$ para visualizar el comportamiento de las sobretensiones producidas y su atenuación.

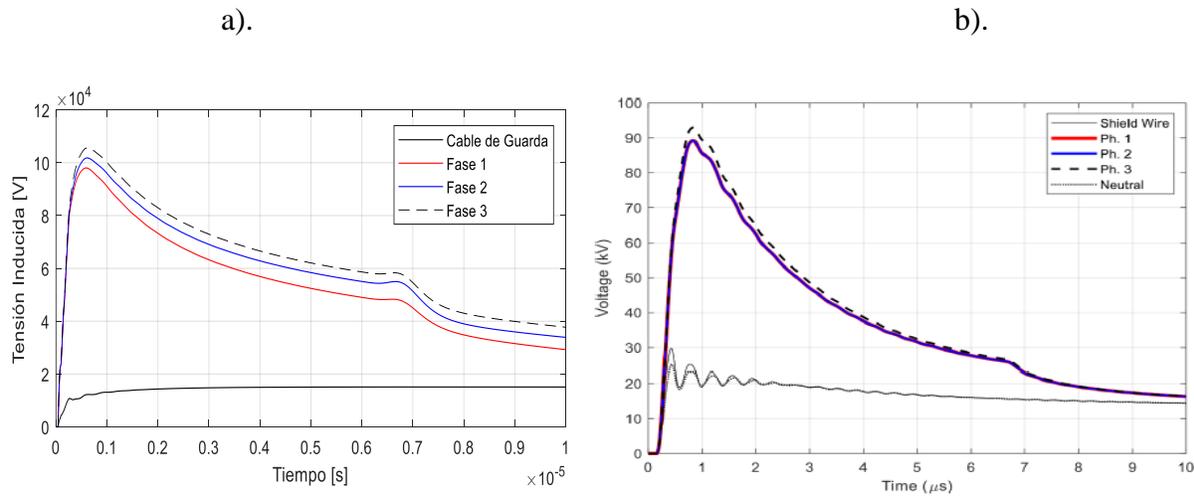
Análogamente, se consideró la conductividad del terreno $\sigma = 1\ \text{mS/m}$, con una permitividad relativa $\epsilon_{rg} = 10$ y una onda de rayo tipo doble Heidler con parámetros de

configuración $I_{01} = 10.7 \text{ kA}$, $\tau_{11} = 0.25 \mu\text{s}$, $\tau_{21} = 2.5 \mu\text{s}$, $n_1 = 2$, $I_{02} = 6.5 \text{ kA}$, $\tau_{22} = 2.1 \mu\text{s}$, $\tau_{22} = 230 \mu\text{s}$, $n_2 = 2$ con una velocidad de descarga de retorno de $1.5 \times (10)^8 \text{ m/s}$ y con un modelo TL de corriente de retorno.

En la Figura 8 se evidenció en cada conductor de fase un aumento de la tensión inducida a medida que se encuentra más cercano al punto en el que se produjo el impacto. Ahora bien, en la fase 3 se obtuvo una máxima amplitud de 105.6 kV que logra reducirse 67.99 kV una vez se completó el tiempo de análisis.

Figura 8.

a). Tensiones inducidas en conductores de fase y cable de guarda debido a una descarga en un punto frontal del centro de la línea de distribución. b) Resultados Obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).



Al comparar los resultados obtenidos en (Tossani, y otros, 2021) se evidenció una leve diferencia en los valores de tensión inducida en el cable de guarda y conductores de fase. Esta

discrepancia se debe a que la ionización del suelo no se tuvo en cuenta, la cual hace que la resistencia de puesta a tierra disminuya en este estudio.

Por otra parte, se analizó el comportamiento de la tensión inducida en función de la posición a lo largo de la línea y la influencia que tiene en cada uno de sus conductores de fase.

De modo similar con el análisis realizado previamente en *Caso 2*, se observó la tensión inducida a lo largo de una línea trifásica, en la cual se estudió el funcionamiento sin cable de guarda y con cable de guarda puesto a tierra en diferentes distancias con un valor de resistencia R_g .

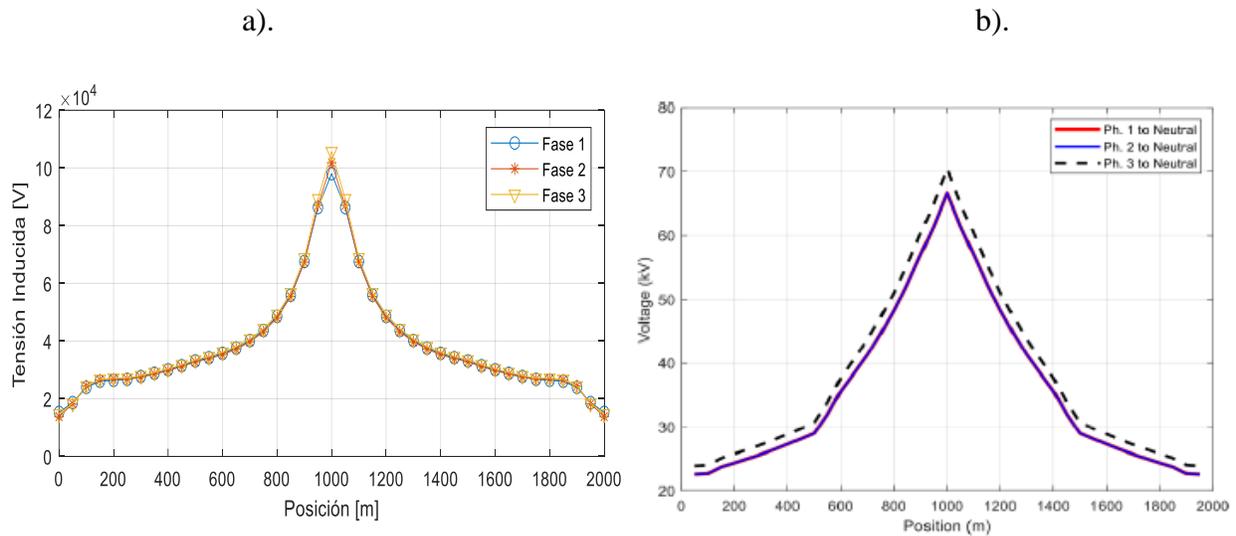
Para este caso, se consideró una línea de distribución trifásica y además, dos diferentes valores para puestas a tierra del cable de guarda a lo largo de la línea de distribución (R_{ga} y R_{gb}). Sin embargo, los resultados evidenciaron el mismo desempeño relacionado con el punto más cercano de la línea de distribución ($x=1000$ m) al impacto de descarga eléctrica, generando la mayor amplitud de tensión inducida por el impacto generando 105.6 kV en la fase 3, 101.8 kV en fase 2 y 98.02 kV para la fase 1.

En la Figura 9 se presentan las tensiones inducidas en los conductores de fase a lo largo de la línea de distribución. El conductor de la fase 3 es el que presentó la mayor tensión inducida (105.6 kV) debido a que su posición relativa y proximidad con el punto de impacto. Sin embargo, se analizó en un punto a 1000 m de distancia del impacto donde la tensión inducida fue de 8.83 kV reduciéndose 92.16%.

Figura 9.

a). Tensiones inducidas en conductores de fase a lo largo de la línea de distribución.

b) Resultados obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).



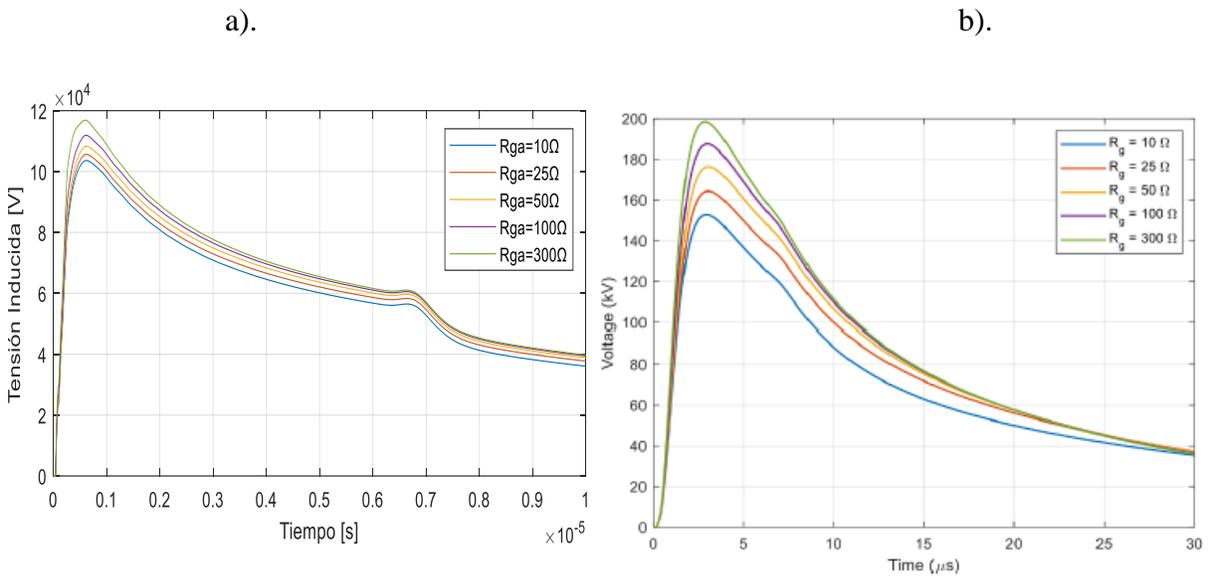
Continuando con el trabajo de investigación de la configuración de la línea de distribución en la Figura 7 se varió el valor de conexión a tierra R_{ga} con valores de 10, 25, 50, 100 y 300 Ω en los distintos puntos a los cuales el cable de guarda se encontró puesto a tierra. Ahora bien, se analizaron las sobretensiones en función del tiempo teniendo en cuenta R_{gb} con valor 300 Ω obtenidos en la figura 10.

En la Figura 10 se analizó la tensión inducida en la fase 3 en donde hubo una relación directa entre la tensión inducida y la resistencia de puesta a tierra del cable de guarda. A medida que se redujo el valor de resistencia de puesta a tierra, menor tensión inducida se generó en los conductores de fase. Para el caso en el cual R_{ga} es de 300 Ω , la sobretensión en la fase 3 presentó un incremento de la tensión inducida con un valor pico de 116.9 kV debido a la proximidad del impacto.

Figura 10.

a) Tensión inducida en la fase 3 para diferentes valores de conexión a tierra R_{ga} .

b) Resultados obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).

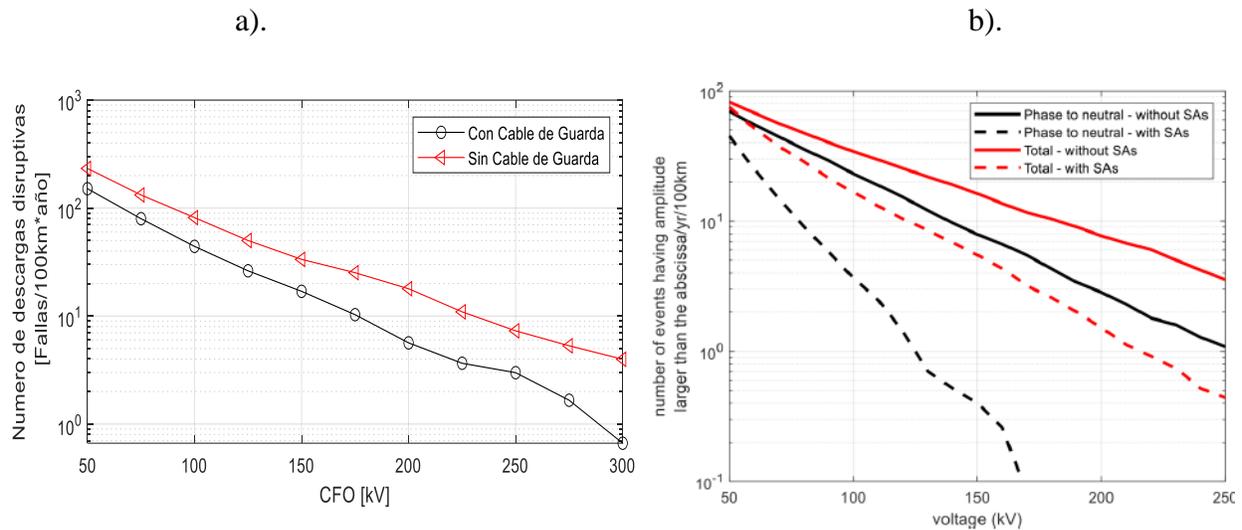


Seguidamente, se analizó el desempeño de la línea de distribución trifásica en (Tossani, y otros, 2021) ante el impacto de rayos, comparando la tasa de fallas con y sin cable de guarda respectivamente. Para cada uno de los casos se simularon 10000 impactos aleatorios de rayos. La densidad de descargas a tierra que se utilizó fue 1 Descarga / $\text{km}^2 \cdot \text{año}$. El área de estudio de los impactos fue de 2 km^2 .

En la Figura 11 a). se comparó la línea de distribución cuando cuenta con cable y sin cable de guarda. El número de descargas que pueden producir flameo en el caso de no contar con cable de guarda es de 33.5 y para el caso de tener cable de guarda es de 16.94 para un nivel de CFO de 150 kV. Por lo tanto, el uso de cable de guarda logra mitigar en un 49.4% el flameo que puede generar daños en la línea para un nivel de CFO de 150 kV.

Figura 11.

a). Tasa de fallas de línea de distribución trifásica. b) Resultados Obtenidos en (Tossani, y otros, 2021).



Por otra parte, con base en (Mariño-Rojas, Muñoz-Delgado, & Soto-Ríos, 2020) se analizaron los impactos directos en el cable de guarda mediante el uso del software ATPDraw, el cual permitió simular la configuración de la línea de distribución de la figura 7, de igual manera que la estructura (torre) de distribución propuesta en (Tossani, y otros, 2021). Seguidamente, se simuló un impacto directo sobre el cable de guarda a una distancia $x = 1000$ m (Centro de la línea de distribución). De esta manera, se obtuvo la corriente crítica a la cual dicha descarga puede superar el CFO de la línea de distribución y se consideraron las condiciones de terreno propuestas en (Tossani, y otros, 2021).

Seguidamente, se obtuvo la probabilidad para la cual la corriente crítica es superada y por consiguiente se calculó la tasa de fallas por flameo inverso (BFR) de la línea de distribución trifásica según (Mariño-Rojas, Muñoz-Delgado, & Soto-Ríos, 2020) la cual se mostró en la tabla

3.

Tabla 2.

Cálculo de tasa de fallas por flameo inverso en función del CFO.

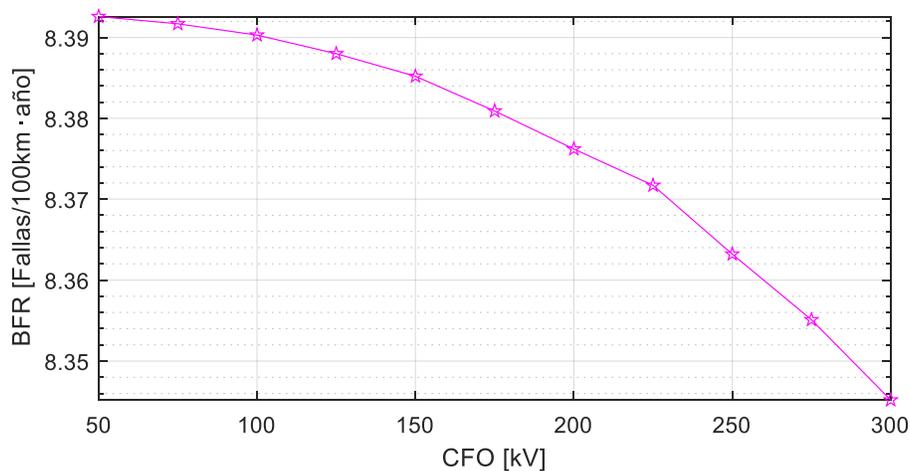
CFO [kV]	50	100	150	200	250	300
<i>I_c [kA]</i>	1.33	2.66	4.01	5.32	6.64	8.03
<i>P(I_c) %</i>	99.97	99.83	99.51	98.99	98.21	97.10
BFR <i>[Fallas/100km·año]</i>	8.39	8.38	8.35	8.31	8.24	8.15

En la Figura 12 se analizó la tasa de fallas por flameo inverso (BFR) en función del CFO de la línea de distribución trifásica, en la cual el valor de BFR para un CFO de 150 kV fue de 8.35 Fallas/100km1año en comparación con el obtenido en la tabla 5 en (Tossani, y otros, 2021) donde se obtuvo 13.3 Fallas/100km1año.

La variación de BFR en función de valores de CFO en el rango de 50 y 300 kV es pequeña para esta configuración de línea de distribución, esto es debido a una corriente crítica pequeña con una alta probabilidad de ocurrencia que no es sensible a los cambios del CFO.

Figura 12.

Tasa de fallas por flameo inverso en línea de distribución trifásica.



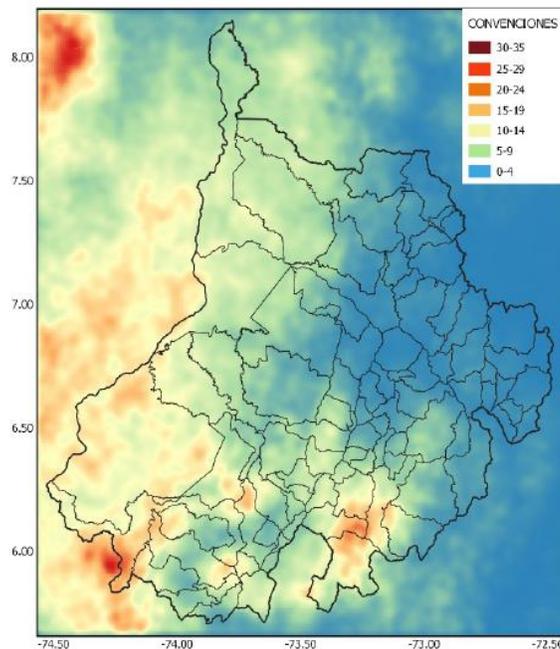
e. Estudio del desempeño de una línea rural monofásica según la norma ESSA

La gran cantidad de descargas eléctricas en zonas rurales son las causantes de daños en las líneas de distribución eléctrica debido al bajo nivel de aislamiento, fallas que se demoran en reparar por la distancia, entre otras. En esta sección se analizará el desempeño de una línea de distribución rural realista de acuerdo con los parámetros de diseño ESSA (ESSA, s.f.) con el fin de mejorar su desempeño ante impactos directos e indirectos de rayos.

Según la norma ESSA (ESSA, s.f.) se deben implementar parámetros para la protección de líneas de distribución rurales principalmente en lugares donde se concentra una mayor actividad de rayos como se observa en el mapa de densidad de descargas a tierra (DDT; rayos / km² / año).

Figura 13.

Mapa de la densidad de descargas a tierra en el departamento de Santander.



Nota. Tomado de (Ardila Murillo, Soto Ríos, & Velandia López, 2022).

De acuerdo a los parametros de la norma, se analizó el desempeño de una línea de distribución rural de 2 km de longitud ante impactos directos e indirectos de rayos. La línea de distribución contó con cable de guarda 7x8 AWG y conductores de fase calibre 2/0 ACSR con un radio de radio 5.675 mm según la norma ESSA (ESSA, s.f.). La corriente de esta simulación no es fija, ya que se utilizó el método de Monte Carlo (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007), en el cual se generan múltiples corrientes.

Se usó una configuración de suspensión con cruceta tipo hache aérea a nivel de tensión 13.2 kV (NC - RA2 - 501, s.f.) en donde el cable de guarda se ubicó a una altura de 4 m de los conductores de fase, los cuales se ubicaron horizontalmente a distancias $y_1 = -2.2$ m, $y_2 = 0$ y $y_3 = 2.2$ m tomando como referencia la posición del cable de guarda. La velocidad de descarga de retorno fue de $1.2 \times (10)^8$ m/s con un modelo de canal de descarga TL. Se simuló en un terreno plano con permitividad relativa de 10 y conductividad de 1 mS/m. Los valores de puestas a tierra fueron de 10Ω con impedancias características a 0 y 1600 m de 489.7Ω .

Para el estudio del desempeño de la línea de distribución rural, se plantearon cuatro escenarios: el primero consistió en implementar el cable de guarda con puestas a tierra al inicio de la línea de distribución y a una distancia de 1600 m. Para el segundo y tercer escenario se conectó a tierra el cable de guarda cada 200m y cada 400 m (distancia mínima sugerida por ESSA (ESSA, s.f.)) a lo largo de la línea de distribución. En el último caso no se consideró el uso del cable de guarda.

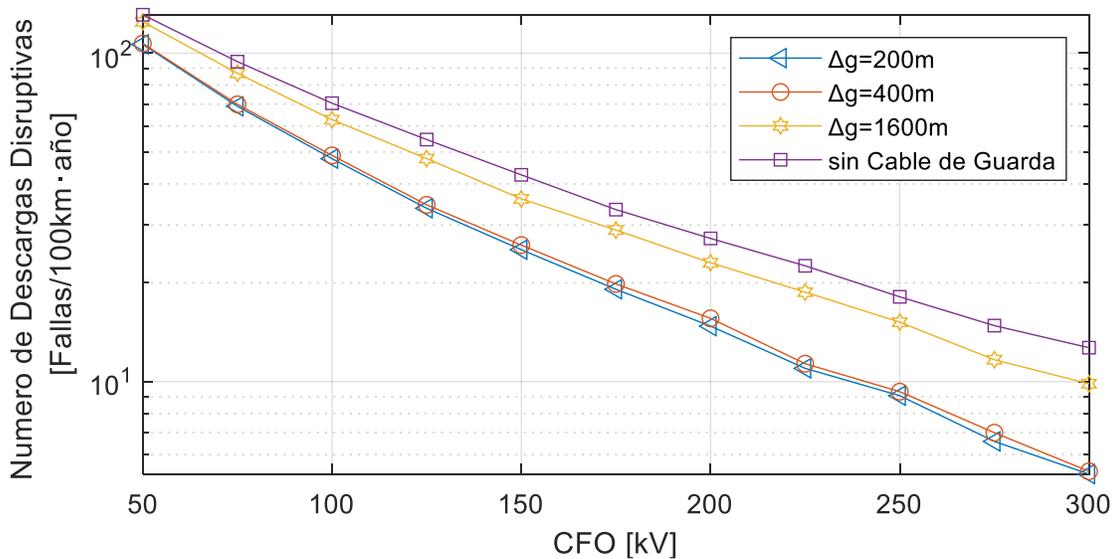
En los resultados presentados en la Figura 14 se analizó el desempeño de la línea de distribución rural al ubicar puestas a tierra cada 400 m (distancia mínima sugerida por ESSA (ESSA, s.f.)) para valores de CFO entre 50 y 300 kV en comparación con distancias de aterrizaje cada 200 m la cual fue pequeña. Ahora bien, ubicar puestas a tierra en un rango de distancias de

400 m (curva roja y distancia mínima sugerida por ESSA (ESSA, s.f.)) y 1600 m (curva amarilla) afecta directamente el desempeño de la línea disminuyendo en un 27% para un CFO de 150 kV y 45% para 300 kV. Por otra parte, el efecto de no implementar cable de guarda aumenta en comparación con ubicar puestas a tierra cada 400 m afecta en un 39 y 58% para valores de CFO 150 y 300 kV respectivamente, incrementando así la probabilidad de producirse flameo en la línea de distribución.

Por otro lado, el no implementar cable de guarda representa un aumento de 15 y 22% para valores de CFO de 150 y 300 kV en referencia a valores de puestas a tierra a 0 y 1600 m.

Figura 14.

Tasa de fallas de línea de distribución rural.



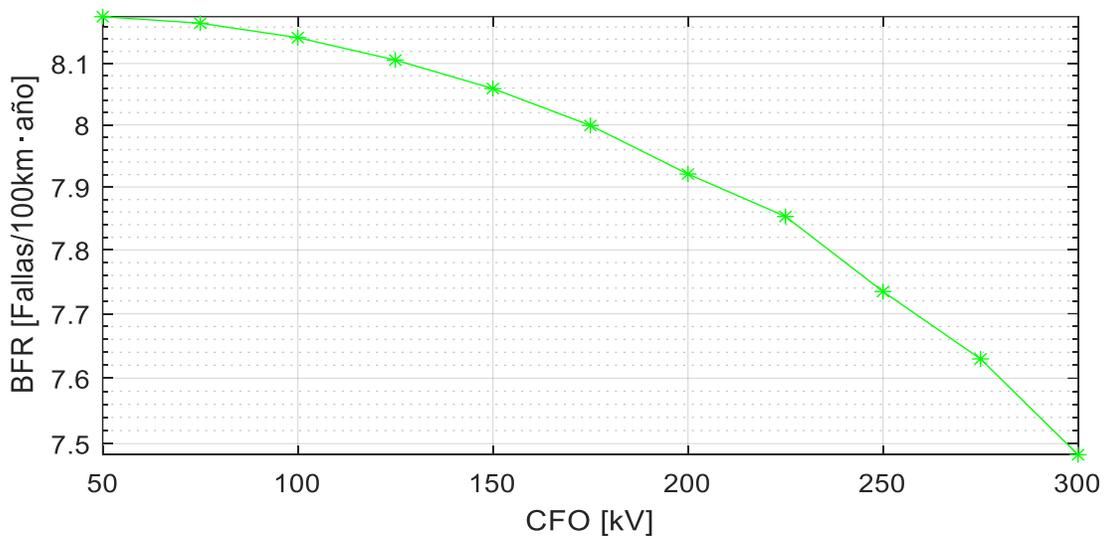
También, se realizó un estudio de impactos directos en el cable de guarda de la línea de distribución rural, con el propósito de analizar el desempeño de la línea obteniendo valores de BFR en función del CFO.

La probabilidad que se produzca flameo para este tipo de impactos es muy alta debido a que se supera fácilmente la corriente crítica teniendo en cuenta los bajos niveles de aislamiento de la línea de distribución.

En la Figura 15 se evidenció una disminución mínima de BFR para valores de CFO entre valores de 50 y 300 kV del 8.5%, esto es debido a una corriente crítica pequeña con una alta probabilidad de ocurrencia que no es sensible a los cambios del CFO.

Figura 15.

Tasa de fallas por flameo inverso en línea de distribución rural.



3. Conclusiones

Las sobretensiones estudiadas en este proyecto han sido un problema muy común en las líneas de distribución eléctricas debido a los impactos directos e indirectos de rayos. Ante esto, la necesidad de implementar el cable de guarda como medida de protección es mucho mayor, ya que la tecnología ha evolucionado haciendo los componentes electrónicos cada vez más pequeños y sensibles a las perturbaciones electromagnéticas.

Como resultado de estudio, la disminución del valor de las resistencias de puestas a tierra influyó directamente en la mitigación de las tensiones inducidas. Utilizar resistencias de 100Ω disminuyó en 24% la tensión inducida a lo largo de la línea en comparación con utilizar resistencias de 900Ω .

Al utilizar el cable de guarda con puestas a tierra cada 500 m se obtuvo un impacto insignificante en la mitigación de las tensiones inducidas a lo largo de la línea en comparación con el no uso del cable de guarda. Por otra parte, al utilizar puestas a tierra cada 200m, se logra disminuir las tensiones inducidas 19% con resistencias de puestas a tierra de 10Ω en comparación con puestas a tierra cada 200 m con resistencias de puestas a tierra de 300Ω .

La magnitud de las tensiones inducidas de los conductores de fase a lo largo de la línea de distribución trifásica varía inversamente con la distancia de impacto del rayo, como en el caso en el que se produce una descarga a 50 m de distancia afectando mayormente el conductor de fase 3.

El número de descargas que pueden producir flameo en una línea de distribución se reduce un 49% utilizando el cable de guarda como medida para mejorar el desempeño de la línea.

Por otra parte, en este trabajo se logra implementar por primera vez el diseño de una línea de distribución rural teniendo en cuenta el uso del cable de guarda para el estudio del desempeño de la línea ante impactos de rayos siguiendo lo establecido por la norma ESSA (ESSA, s.f.). Cuando no se utiliza cable de guarda se produce un mayor número de flameos en comparación con utilizar cable de guarda con puestas a tierra cada 400 m. Para el caso de CFO de 150 kV el no utilizar cable de guarda incrementa un 39% el número de flameos en la línea de distribución.

Análogamente, se concluyó que se debe implementar el cable de guarda con puestas a tierra como mínimo cada 400 m para mejorar el desempeño a lo largo de la línea, ya que para valores menores de puesta a tierra la diferencia es pequeña.

Referencias Bibliográficas

- Agrawal, A., Price, H., & Gurbaxani, S. (1980). Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-22, no. 2, 119–129.
- Ardila Murillo, B. S., Soto Ríos, E. A., & Velandia López, K. A. (2022). Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. *Ingeniería*, 26(3), 419–435. doi:<https://doi.org/10.14483/23448393.17585>.
- Borghetti, A., 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*, vol. 22, no. 1, 684–692. doi:[10.1109/TPWRD.2006.881463](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881463)
- De Conti, A., Perez, E., Soto, E., Silveira, F., Visacro, S., & Torres, H. (2010). Calculation of lightning-induced voltages on overhead distribution lines including insulation breakdown, *IEEE Trans. Power Deliv.* 25 , 3078–3084.
- ESSA. (s.f.). *NTG-01 Norma electrificación rural - Marco General para Sistemas de Distribución* .
- Gómez, J., & Morcos, M. (2002). Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 17, N.º 4, 1037-1043.
- Heidler, F., Cvetic, J., & Stanic, B. V. (1999). Calculation of Lightning Current Parameters. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 14, no. 2.

IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. (2011). *IEEE Std 1410™2010*.

Mariño-Rojas, J. A., Muñoz-Delgado, J. A., & Soto-Ríos, E. A. (2020). Influencia de los sistemas de puesta a tierra descritos en el estándar IEEE 1243 en la tasa de fallas por rayos de líneas de transmisión. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 223–238.

Master, M. J., & Uman, M. A. (1983). Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole. *Am. J. Phys.*, vol. 51, 118–126.

NC - RA2 - 501. (s.f.). Norma de construcción red aérea nivel de tensión 13.2 kV hache. . *Configuración suspensión con cruceta de 4500 mm*.

Paolone, M., Nucci, C. A., Petrache, E., & Rachidi, F. (2004). Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium Voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding wires and of surge arresters: modeling and experimental validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, 423-431. doi:doi: 10.1109/TPWRD.2003.820196

Scientific Figure on ResearchGate. (s.f.). *Yaluk draw: software especializado para análisis del desempeño de líneas de distribución ante impacto de rayos*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Eschema-de-funcionamiento-del-Yaluk-Draw_fig1_260035287

Soto Rios, E. A., Perez, E., & Del Rio Trujillo, D. F. (2021). Use of Rusck formula and Multi-nonlinear Regression to Discard Events Required to Calculate the Lightning Performance of Overhead Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*,. doi:doi: 10.1109/TPWRD.2021.3131542

Tossani, F., Napolitano, F., Borghetti, A., Nucci, C., Piantini, A., Kim, Y.-S., & Choi, S.-K.
(2021). *Influence of the presence of grounded wires on the lightning performance of a
medium-voltage line.*