

Tasa de fallas por impactos directos e indirectos en líneas de distribución compactas

Ronaldo De Jesús Jaimes Rodríguez

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 Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Quiero agradecer a Dios por guiarme en este camino y brindarme las mejores posibilidades para salir adelante.

A mis padres Pedro Elías Jaimes Suarez y Elvira Rodríguez Quintero ya que son el principal motivo de todo este proceso, por todo su esfuerzo, apoyo incondicional y por tanto cariño que me han brindado.

A mi hermano Leonardo Dayan Jaimes Rodríguez, por ser mi compañero de momentos de toda la vida y compartir momentos agradables, cariño y apoyo.

A toda mi familia, amigos y compañeros por sus bendiciones y buenos consejos, También le doy las gracias a la Universidad Industrial De Santander y docentes que hicieron parte de toda mi formación profesional.

Agradecimientos

Doy gracias al profesor Edison Andrés Soto Ríos, por sus consejos, conocimientos profesionales compartidos, colaboración y apoyo para ver cumplido mi meta hoy. Usted fue pieza fundamental en esta investigación, gracias por sus orientaciones.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Problema	13
3. Antecedentes	13
4. Metodología	14
4.1 Geometría de la línea	14
4.2 Método de Monte Carlo.....	18
4.3 Método de Muestreo Estratificado.....	19
5. Resultados	21
5.1 Simulación de Transitorios	21
5.2 Resultados del Muestreo Estratificado.....	26
5.3 Resultados de la Tasa de Fallas ante Impactos Indirectos para una Red Compacta.....	30
5.4 Resultados de la Tasa de Fallas ante Impactos Directos para una Red Compacta	32
6. Conclusiones	35
Referencias Bibliograficas	37

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Distribución espacial de los conductores de fase.....	15
Tabla 2 Parámetros eléctricos para el modelo de la torre	16

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Distribución espacial de los conductores	15
Figura 2 Circuito mixto que modela la torre conectada entre el cable mensajero y la resistencia de puesta a tierra	17
Figura 3 Curva de tensión soportada para conductores de 15 kv con aislamiento XLPE	18
Figura 4 Localización del impacto indirecto	22
Figura 5 Forma de onda de la corriente del rayo con corriente pico de 12 ka y derivada máxima 40 ka/ μ s.....	23
Figura 6 Tensión inducida simulada por impacto indirecto en los conductores usando Yaluk Draw.	24
Figura 7 Tensión inducida por impacto indirecto en los conductores	24
Figura 8 Tensión inducida por impacto directo en los conductores usando Atp Draw	25
Figura 9 Tensión inducida por impacto directo en los conductores	25
Figura 10 Posición de los eventos generados por el muestreo estratificado con la línea ubicada sobre el eje x	28
Figura 11 Histograma de 10,000 eventos asignados por la técnica de muestreo en los subdominios	29
Figura 12 Comparación del error relativo obtenido por la técnica estratificada y Monte Carlo. 29	29
Figura 13 Comparación de tasa de fallas por impactos indirectos entre el muestreo estratificado y Monte Carlo	30

Figura 14 Tasa de fallas por impactos indirectos de una línea de distribución compacta con conductividad del terreno $\sigma_g = 1 \text{ ms/m}$ y resistencia de puesta a tierra $R_g = 20 \Omega$	31
Figura 15 Circuito propuesto en Atp Draw para simular las tensiones entre conductores de fase - estructura y obtener la corriente crítica.....	34
Figura 16 Tensión entre la estructura y el conductor R de la red compacta.....	34
Figura 17 Tasa de fallas por impactos directos para la línea de distribución compacta.....	35

Glosario

Densidad de descargas tipo rayo a tierra, DRT (GFD) (Ng): El número promedio de descargas tipo rayo por unidad de área por unidad de tiempo en una ubicación particular.

Descarga directa: Una descarga directa tipo rayo a cualquier parte de la red o instalación eléctrica.

Descarga Indirecta: Es un impacto por rayo localizado en la superficie del terreno cercano a la línea área o estructuras cercanas.

Flameo inverso (descarga tipo rayo): Un flameo del aislamiento resultante de una descarga tipo rayo a una parte de la red o de la instalación eléctrica que está normalmente potenciada a tierra.

Línea de distribución: Líneas de energía eléctrica que distribuyen energía desde una subestación de suministro principal a los usuarios, generalmente a tensiones 34,4 Kv o menos.

Red compacta: Se compone de un grupo de conductores aislados por una capa gruesa, un cable portante o conductor de neutro que sostiene a los conductores de fase por medio de unos espaciadores.

Tensión de flameo de impulso crítico, VFIC (CFO) (aisladores): El valor de cresta de onda de impulso que, bajo condiciones especificadas, causa flameo a través del medio que lo rodea en el 50% de las aplicaciones.

Tensión inducida (descargas tipo rayo): La tensión inducida en una red o en una instalación eléctrica por una descarga indirecta

Resumen

Título: Tasa de fallas por impactos directos indirectos en líneas de distribución compactas *

Autor: Ronaldo De Jesús Jaimes Rodríguez **

Palabras clave: Red compacta, tensiones inducidas, Monte Carlo, muestreo estratificado, tasa de fallas.

Descripción: En este artículo se obtiene el índice de fallas en una línea de distribución compacta de media tensión. El índice de fallas es la cantidad de eventos por impactos directos e indirectos de rayos que causan una tensión mayor que el CFO de la línea. Este artículo se enfoca en una configuración compacta de un solo circuito a 15-kV. Debido a la presencia del cable mensajero en la red compacta, se protegen las fases de los conductores ante las descargas directas tipo rayo y reduce las tensiones inducidas por impactos de rayos a tierra. Obtener la tasa de fallas ante impactos directos e indirectos de rayos en líneas de distribución compactas, sirve como estrategia para la planificación del mantenimiento de sus sistemas de distribución; afrontando nuevos desafíos como: el aumento de costos operativos, crecimiento de la demanda, requerimiento de elevados niveles de confiabilidad y calidad del servicio. Se efectúa un estudio de la tasa de fallas ante impactos directos e indirectos de rayos en líneas de distribución compacta, realizando simulaciones en tiempo con modelos estadísticos como: la técnica de muestro estratificada. Para el índice de fallas ante impactos indirectos el número de eventos indirectos obtenidos fue 99,021 y eventos directos 979. En los impactos directos la tasa de fallas por flameo inverso fue 5.53%.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica Telecomunicaciones, Director Edison Andrés Soto Ríos, Doctorado en Ingeniería

Abstract

Title: Tasa de fallas por impactos directos indirectos en líneas de distribución compactas*

Author: Ronaldo De Jesús Jaimes Rodríguez**

Key Words: induced voltages, Monte Carlo, stratified sampling, lightning performance.

Descripción: This paper obtains the failure rate in a compact medium voltage distribution line. The failure rate is the number of events due to direct and indirect lightning strikes that cause a higher voltage than the CFO of the line. This paper focuses on a compact single circuit 15 kV configuration. Due to the presence of the messenger cable in the compact network, the phases of the conductors are protected against direct lightning-type discharges and reduce the stresses induced by lightning impacts to earth. Obtaining the failure rate for direct and indirect lightning strikes in compact distribution lines, serves as a strategy for planning the maintenance of your distribution systems; facing new challenges such as: increased operating costs, demand growth, requirement for high levels of reliability and quality of service. A study of the failure rate in direct and indirect lightning strikes in compact distribution lines is carried out, carrying out simulations in time with statistical models such as: the stratified sampling technique. For the failure rate for indirect impacts, the number of indirect events obtained was 99,021 and direct events 979. In direct impacts, the failure rate for reverse flutter was 5.53%.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director Edison Andrés Soto Ríos, Doctor in Engineering.

Introducción

Debido al crecimiento en la demanda de energía eléctrica en Colombia con un promedio anual entre 2.68% a 3.05% y las exigencias de la normatividad en las distancias de seguridad, nace la necesidad de optar por tecnologías como la red compacta que se convierte en la solución a los problemas de servidumbre porque su estructura física ocupa menos espacio que una red convencional. En una red compacta se reducen las distancias entre fases mediante espaciadores con el propósito de disminuir el requerimiento de espacio físico.

La descarga tipo rayo es la mayor causa de fallas de las líneas aéreas de distribución. La creciente preocupación por la calidad de la energía eléctrica ha creado aún más interés en las descargas atmosféricas y al obtener la tasa de fallas ante impactos directos e indirectos de rayos en líneas de distribución compactas sirve como estrategia para la planificación del mantenimiento porque da una idea para el mejoramiento de las protecciones contra las descargas tipo rayo de las líneas aéreas de distribución siendo considerado como una forma de reducir el número de interrupciones momentáneas y las disminuciones de tensión.

Se efectúa un estudio de la tasa de fallas por impactos directos e indirectos de rayos en líneas de distribución compacta, realizando simulaciones en tiempo con modelos estadísticos como: la técnica de muestro estratificada y monte Carlo. Para cada simulación de la técnica estratificada se calcula el error relativo, obteniendo el número esperado de eventos que causan una tensión con una mayor amplitud que la tensión de aislamiento predeterminado en la red compacta.

1. Objetivos

Los objetivos generales y específicos planteados para la realización de este trabajo de grado son:

1.1 Objetivo General

Obtener la tasa de fallas ante impactos directos e indirectos de rayos en líneas de distribución compactas.

1.2 Objetivos Específicos

- Calcular las tensiones inducidas por rayos en una línea de distribución compacta
- Implementar la técnica de muestreo estratificada en una línea de distribución compacta que permita una reducción considerable del tiempo computacional.
- Obtener la tasa de fallas por impactos directos e indirectos de rayos.

2. Problema

La descarga tipo rayo es la mayor causa de fallas de las líneas aéreas de distribución. La creciente preocupación por la calidad de la energía eléctrica ha creado aún más interés en las descargas atmosféricas, y el mejoramiento de las protecciones contra las descargas tipo rayo de las líneas aéreas de distribución está siendo considerado como una forma de reducir el número de interrupciones momentáneas y las disminuciones de voltaje.

La descarga atmosférica tipo rayo causa generalmente fallas temporales en las líneas aéreas distribución. Si la falla es aclarada por un interruptor o por un conmutador, el circuito será cerrado exitosamente. En el pasado esto era aceptable pero ahora con la proliferación de cargas sensitivas, las interrupciones momentáneas son la mayor preocupación.

Las descargas atmosféricas tipo rayo pueden causar también fallas permanentes. Se cree que de las fallas causadas por descargas atmosféricas el 5% al 10% causan daño permanente al equipo.

Estimar el comportamiento a las descargas tipo rayo de una línea de distribución tiene mucha incertidumbre. Algunos de los puntos básicos tales como la intensidad de descarga medida por la densidad de rayos a tierra, o estimar el número de descargas a una línea puede tener errores muy significativos.

3. Antecedentes

Lightning protection of a compact MV power line sharing the same poles of a HV

Line: Este artículo calcula la tasa de fallas para una línea área con doble circuito conectado a

media-alta tensión y hace énfasis en la protección de los conductores de la línea compacta a 15-kV que comparte la misma estructura con una línea de transmisión a 69-kV o 138-kV.

Lightning-Originated Overvoltages in a Multi-Circuit HV-MV Line: Realiza simulaciones en el tiempo de impactos directos e indirectos para una línea compacta sola a 15-kV y acompañada con una línea de distribución a 69-kV.

Lightning Performance Assessment of Power Distribution Lines by means of Stratified Sampling Monte Carlo Method: Propone la aplicación de la técnica de muestreo estratificada para analizar la tasa de fallas en líneas de distribución mediante la aplicación del método de Monte Carlo.

4. Metodología

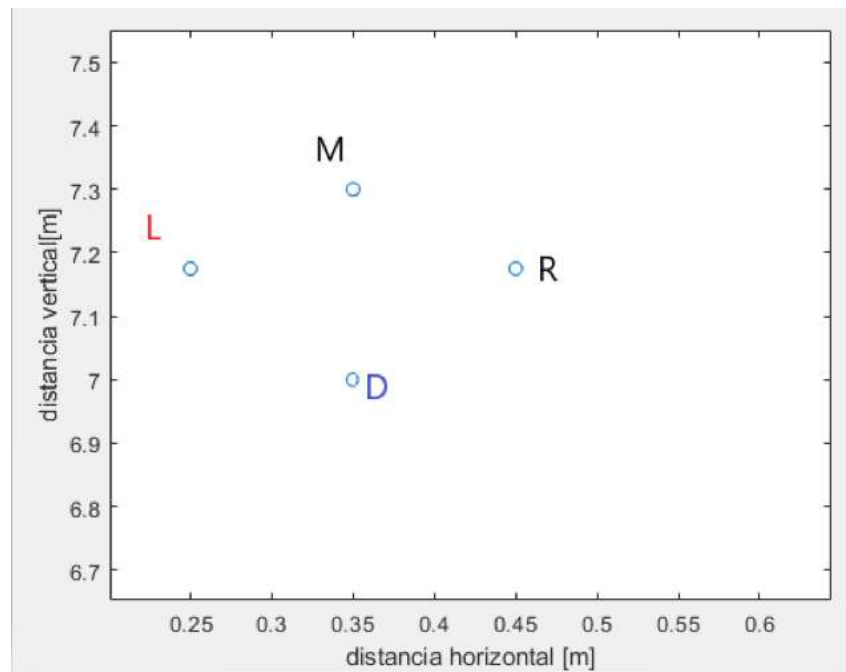
4.1 Geometría de la línea

En este artículo considera una línea área como se muestra en la tabla 1: línea de media tensión (15 kV de aislamiento) que tiene una estructura compacta con distancias reducidas entre sus conductores de fases y espaciadores periódicos suspendidos por el cable mensajero. La línea de media tensión es localizada a 7 m de la tierra. El espaciamiento entre estructuras es de 35 m. En figura 1 se muestra la distribución espacial de los conductores de la red compacta.

Tabla 1 *Distribución espacial de los conductores de fase*

Conductor	X[m]	Y[m]
L	0.25	7.175
D	0.45	7.175
R	0.35	7
M	0.35	7.3

Nota. Elaboración propia.

Figura 1 *Distribución espacial de los conductores*

Nota. Elaboración propia

Los conductores de media tensión están denominados de la siguiente manera, conductor mensajero (M), conductor de la fase izquierda (L), conductor de la fase derecha (R), conductor de

abajo (D), X es la longitud horizontal desde el centro de la línea y Y es la altura vertical desde el suelo a los conductores de fase.

En todas las simulaciones se asume una conductividad de tierra igual a $\sigma_g = 1 \text{ mS/m}$ y no es considerado el efecto de ionización que se genera en la resistencia de puesta a tierra.

El modelo de la torre es considerado como lo describen en (Kawamura, 2005). En la figura 2 se muestra el circuito mixto empleado que consiste en la impedancia de la torre en serie con el paralelo de una resistencia e inductancia, sus extremos están conectados al cable mensajero y a tierra respectivamente.

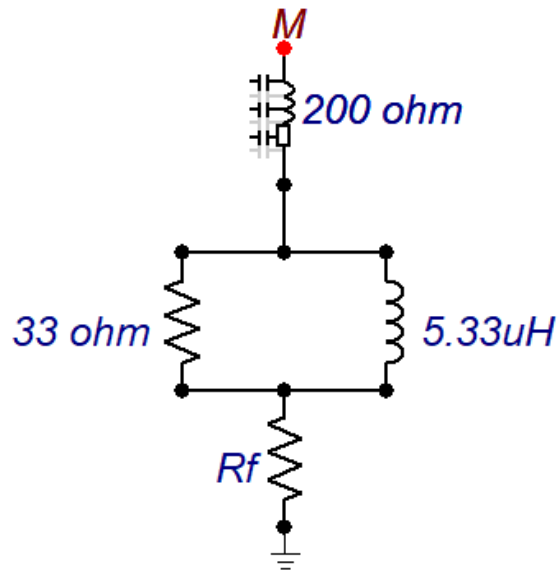
En la tabla 2 se muestra el valor de los parámetros del circuito mixto. El valor de la impedancia de la torre es igual a $Z_p=200 \Omega$ acorde a los datos experimentales presentados en (K. Nakada, 2003). Los valores de la resistencia y la inductancia del modelo de la torre están estimados acorde con lo propuesto en (Kawamura, 2005). Estos valores son $R_p=33 \Omega$ y $L_p=5.33 \mu\text{H}$.

Tabla 2 *Parámetros eléctricos para el modelo de la torre*

$Z_p[\Omega]$	$R_p[\Omega]$	$L_p[\mu\text{H}]$
200	33	5.33

Nota. Elaboración propia

Figura 2 Circuito mixto que modela la torre conectada entre el cable mensajero y la resistencia de puesta a tierra



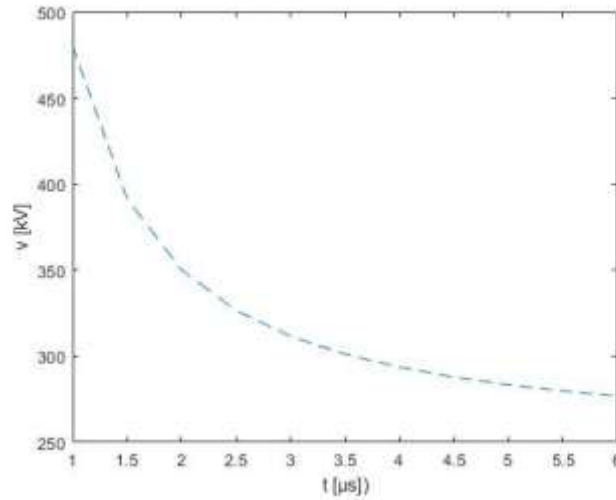
Nota. Tomado de Atp Draw.

Se tiene en cuenta el aislamiento de los conductores con contribución XLPE, para el cual se propone una curva de voltaje-tiempo que consiste en la tensión soportada en los aisladores en función del tiempo de ruptura del aislamiento. Con los datos experimentales obtenidos en conductores espaciados y desnudos a 15 kV, ha sido adicionado 100 kV a las amplitudes pico de la curva experimental de conductores desnudos para tener en cuenta la contribución XLPE (con espesores que van desde 2.3 a 3.3 mm) (Wareing, 2005).

La figura 3 muestra la curva v-t obtenida adicionando la contribución del XLPE, esta curva es modelada por la siguiente función

$$v(t) = A + \frac{B}{t^c} \quad (1)$$

Donde A, B, y C son determinadas por transformaciones lineales de funciones, es decir se parte de una función básica y se ajustan los parámetros A, B y C hasta llegar a la figura 3.

Figura 3 Curva de tensión soportada para conductores de 15 kV con aislamiento XLPE

Nota. Elaboración propia.

4.2 Método de monte Carlo.

El enfoque estándar de Monte Carlo es aplicado en la evaluación de la tasa de fallas para líneas de distribución consiste en generar una gran cantidad de eventos, cada evento caracterizado por diferentes valores en los parámetros de la forma de onda para la corriente del rayo y la respectiva localización del impacto. Los parámetros de la corriente del rayo son calculados de acuerdo a la distribución de probabilidad del (Cigré, 1991). Las coordenadas de localización del impacto son asumidas por una distribución uniforme en un área lo suficiente grande que contenga todos los eventos que causen una tensión mayor que el CFO en estudio.

El número anual esperado de eventos Fp que causan tensiones con amplitud mayor que el CFO de una línea es:

$$Fp = \frac{n}{n_{tot}} * A * N_g \quad (2)$$

Donde n es la cantidad de eventos que causan un voltaje mayor que el nivel de CFO de la línea, n_{tot} es la cantidad total de eventos indirectos simulados, A es el área donde se localizan los y N_g es la densidad de impactos directos a tierra por año (es asumida como en el artículo (A. Borghetti F. N., 2019), $N_g=1$ flash/km²/año).

C_p es el error relativo y puede ser calculado por la expresión:

$$C_p = 1.96 \sqrt{\frac{1-p}{n_{tot}p}} \quad (3)$$

4.3 Método de muestreo estratificado

Para el análisis estadístico de Monte Carlo estratificado se define una variable aleatoria X con dos posibles valores. $X_k=1$ si el evento k de Monte Carlo causa una tensión más grande que el CFO en estudio, 0 si no. Como en los métodos estándar de Monte Carlo, la probabilidad de observar una sobretensión mayor que el CFO es estimada por:

$$\hat{p} = \frac{n}{n_{tot}} = \frac{1}{n_{tot}} \sum_{k=1}^{n_{tot}} X_K \quad (4)$$

Donde n_{tot} es el número total de eventos indirectos simulados y n es la suma de todos los eventos indirectos que superan el CFO de la línea.

La respectiva localización de los impactos para cada evento en ausencia de líneas eléctricas y otras estructuras es asumida haciendo una distribución uniforme de impactos a tierra en el área total A .

Para la aplicación del método de Monte Carlo estratificado, el área total A es dividida en m subdominios y probabilidades p estimadas por

$$\hat{\vartheta} = \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{A} \left(\frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} X_{jk} \right) \quad (5)$$

Donde a_j es el área del subdominio j , N_j es el total de eventos de Monte Carlo en el subdominio j tal que $\sum_{j=1}^m N_j = N_{tot}$, y X_{jk} es la observación k en el subdominio j . la variancia del estimador $\hat{\vartheta}$ es estimada por

$$Var(\hat{\vartheta}) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{a_j}{A} \right)^2 \frac{\sigma_j^2}{N_j} \quad (6)$$

Donde σ_j^2 es la variancia de la variable aleatoria X en el subdominio j . Los valores de σ_j^2 no son conocidos inicialmente, ellos son estimados por un numero de eventos iniciales N_s con Monte Carlo, para llevar acabo esto el mismo número de eventos iniciales N_s se genera en cada subdominio y N_s debe ser lo suficientemente grande para estimar σ_j^2 .

C_{ϑ} Es el error relativo estimado por la siguiente ecuación:

$$C_{\vartheta} = \frac{1.96}{\hat{\vartheta}} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{a_j}{A} \right)^2 \frac{\sigma_j^2}{N_j}} \quad (7)$$

Partiendo de la estimación inicial de σ_j^2 , el procedimiento agrega nuevos eventos de Monte Carlo hasta que C_{ϑ} sea más baja que la estimación deseada.

Cada nuevo evento de Monte Carlo es asignado en el área A de acuerdo a una distribución uniforme ponderada con diferentes pesos ω_j para cada subdominio. El peso ω_j de cada subdominio j es proporcional a la variancia σ_j^2 correspondiente, siempre que todos los

subdominios tengan la misma área (Brandimarte, 2014). La suma de los pesos de todos los subdominios m es igual a 1.

$$\omega_j = \frac{\sigma_j^2}{\sum_{j=1}^m \sigma_j^2} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad (9)$$

Si el número de casos iniciales N_s es muy pequeño, se podría obtener un pequeño valor inicial σ_j^2 nulo, en este caso el peso del subdominio puede ser asignado a los correspondientes de los subdominios más cercanos (F. Napolitano, 2018).

Los valores de σ_j^2 se actualizan después de cada ejecución de Monte Carlo.

5. Resultados

5.1 Simulación de transitorios

Esta sección presenta la respuesta transitoria de la línea compacta debido a un campo electromagnético, originado por un impacto a tierra cercano a la línea y un impacto directo. Estas simulaciones serán realizadas en el dominio del tiempo, despreciando la presencia de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS).

Se realiza la validación de los artículos (A. Borghetti G. M., 2018) y (A. Borghetti F.

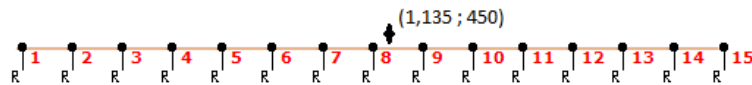
N., 2019) para los cuales se presentan los siguientes casos.

La línea tiene una longitud de 1400 m y es conectada en sus extremos a la impedancia característica. Con respecto al sistema de coordenadas x-y el extremo izquierdo de la línea está ubicado en el punto $x=400$ m, $y=400$ m. Con el eje x paralelo a la línea el extremo derecho se ubica en los puntos $x=1,800$ m y $y=400$ m.

En la figura 4 se muestra la localización del impacto, ubicado en el punto $x=1,135$ m, $y=450$ m. La velocidad de la descarga de retorno se asume $1.5 * 10^8$ m/s y es adoptado el modelo de la corriente de retorno (TL) (M. A. Uman and D. K. Mclain, 1969). La corriente tiene una amplitud pico de 12 kA y la máxima derivada es de 40 kA/ μ s.

En la figura 5 se muestra forma de onda de la corriente, esta es representada por la suma de dos funciones de (Heidler, 1985) con los siguientes parámetros (C. A. Nucci, 1993): $I_{01}=10.7$ kA, $\tau_{11}=0.25$ μ s, $\tau_{21}=2.6$ μ s, $n_1=2$, $I_{02}=6.5$ kA, $\tau_{12}=2.1$ μ s, $\tau_{22}=230$ μ s, $n_2=2$.

Figura 4 Localización del impacto indirecto



Nota. Tomado de Yaluk Draw

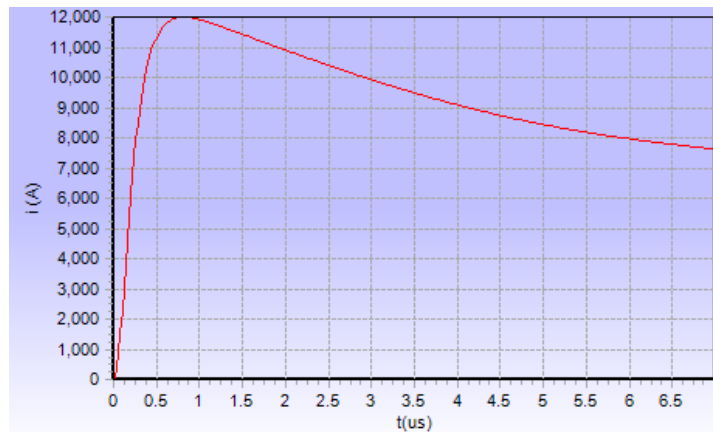
La figura 6 y 7 grafica las sobretensiones inducidas en los conductores debido al impacto indirecto en el punto $x=1,135$ m, $y=450$ m para el caso de $R_g = 20 \Omega$. Las sobretensiones son calculadas por cada fase, entre los conductores y tierra.

En la figura 6 se muestra una tensión máxima inducida igual a 63 kV en el conductor

de fase D, la diferencia de tensión entre conductores de fase es mínima, la curva M muestra que en el cable mensajero se induce una tensión máxima de 9 kV y en la figura 7 se muestra la tensión inducida obtenida en (A. Borghetti G. M., 2018) para la comparación de resultados. La diferencia es debido a no se consideró el efecto de ionización del suelo el cual hace que la resistencia de puesta a tierra cambie según la corriente del rayo y no se mencionó en el artículo el radio del conductor usado para los conductores L, D, R y M.

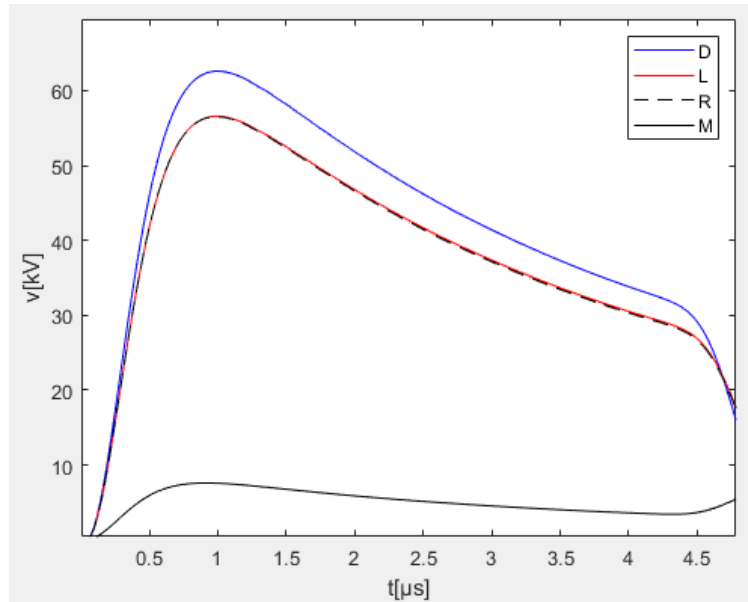
Ahora se considera un impacto directo producido por una función de corriente (Cigré, 1991). Con un valor pico de 31 kA y una derivada de tiempo máximo $26 \text{ kA}/\mu\text{s}$. La figura 8 muestra las sobretensiones producidas en los conductores L, D, R y M de media tensión. Se asumió un impacto directo en el conductor mensajero ubicado en el punto medio de la línea conectada a una resistencia de puesta a tierra $R_g=40 \Omega$. La figura 9 son los resultados obtenidos en (A. Borghetti G. M., 2018). Se presentan diferencias en el tiempo pico de máxima tensión porque en ATP DRAW se calculó el tiempo de frente de manera aproximada con el fin de tener el tiempo máximo de derivada más cercano posible a $26 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

Figura 5 Forma de onda de la corriente del rayo con corriente pico de 12 kA y derivada máxima $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$



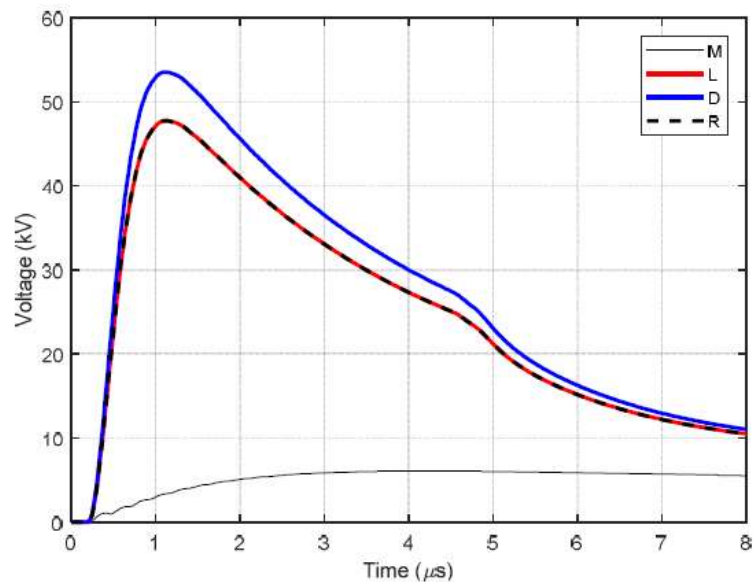
Nota. Tomado de Yaluk Draw.

Figura 6 Tensión inducida simulada por impacto indirecto en los conductores usando Yaluk Draw.

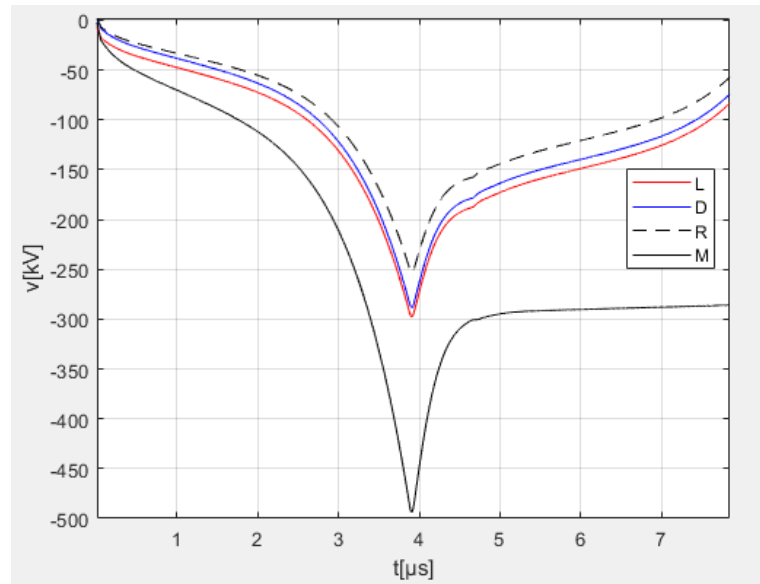


Nota. Elaboración propia

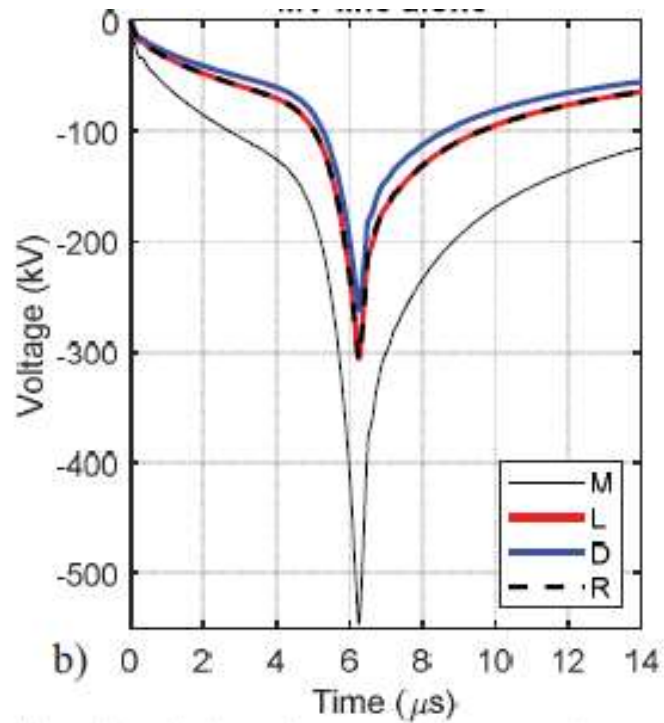
Figura 7 Tensión inducida por impacto indirecto en los conductores



Nota. Tomado de Lightning protection of a compact MV power line sharing the same poles of a HV Line.

Figura 8 Tensión inducida por impacto directo en los conductores usando Atp Draw

Nota. Elaboración propia

Figura 9 Tensión inducida por impacto directo en los conductores

Nota. Tomado de Lightning-Originated Overvoltages in a Multi-Circuit HV-MV Line.

5.2 Resultados del muestreo estratificado

En esta sección se pretende aplicar la técnica de muestreo estratificada mencionada en la sección II.B y comparar los resultados sin aplicar la técnica de muestreo estratificada a una línea sencilla propuesta por el artículo (F. Napolitano, 2018).

En esta simulación se calcula las tensiones inducidas usando la formula simplificada de Rusck propuesto en (IEEE Std 1410, 2004) para terrenos con conductividad ideal y líneas sencillas.

Cada evento está caracterizado por dos parámetros, corriente pico del rayo I_p , y la localización del impacto con coordenadas espaciales X_o y Y_o , para el cálculo de I_p se asume la distribución normal logarítmica propuesta por el Cigré. Los puntos X_o y Y_o son asignados de acuerdo a la distribución uniforme ponderada mencionada en la sección II.B (ecuación 8). Cada evento fue clasificado como impacto directo o indirecto según la metodología del modelo electro geométrico de Whitehead propuesto en (IEEE Std 1410, 2004).

Los eventos directos e indirectos son analizados por separado y en este análisis todos los eventos clasificados como directos no son incluidos en el cálculo de la tasa de fallas F_p . Esta sección enfoca los impactos indirectos.

El procedimiento de muestreo estratificado será aplicado a una línea sencilla recta de un solo conductor, suponiendo un nivel de CFO de 150 kV, la línea es de 2 km de longitud, 10 metros de altura, como el ejemplo en (F. Napolitano, 2018) para comparar los resultados con una línea sencilla con conductividad infinita.

En la figura 10 se muestra la vista superior del área considerada (la línea se encuentra localizada sobre el eje x) y la localización de los impactos se asume que son simétricos con respecto a la línea. La figura muestra la localización de los impactos indirectos. Para este caso

fue considerada un área total de simulación 2 x 2 km, dividida en $m=50$ subdominios rectangulares con ancho 2 km y largo 0.004 km para un área de cada subdominio igual a 2 x 0.04 km.

El número de eventos iniciales con Monte Carlo es 5,200 y se usa para estimar una varianza inicial σ_j en cada subdominio. El siguiente impacto es asignado según la distribución uniforme ponderada de pesos (ecuación 8). Se simularon un total de 15,200 eventos de los cuales 10,000 fueron asignados con la técnica de muestreo estratificada.

La figura 10 muestra la localización de los impactos generados implementando la técnica de muestreo estratificada. Se observa que la mayoría de los impactos se localizan cerca de la línea debido a la alta varianza en las tensiones inducidas cerca de la línea, esto impacto en la distribución de pesos ponderados (ecuación 8) para que tuviera un mayor peso en los subdominios cercanos a la línea.

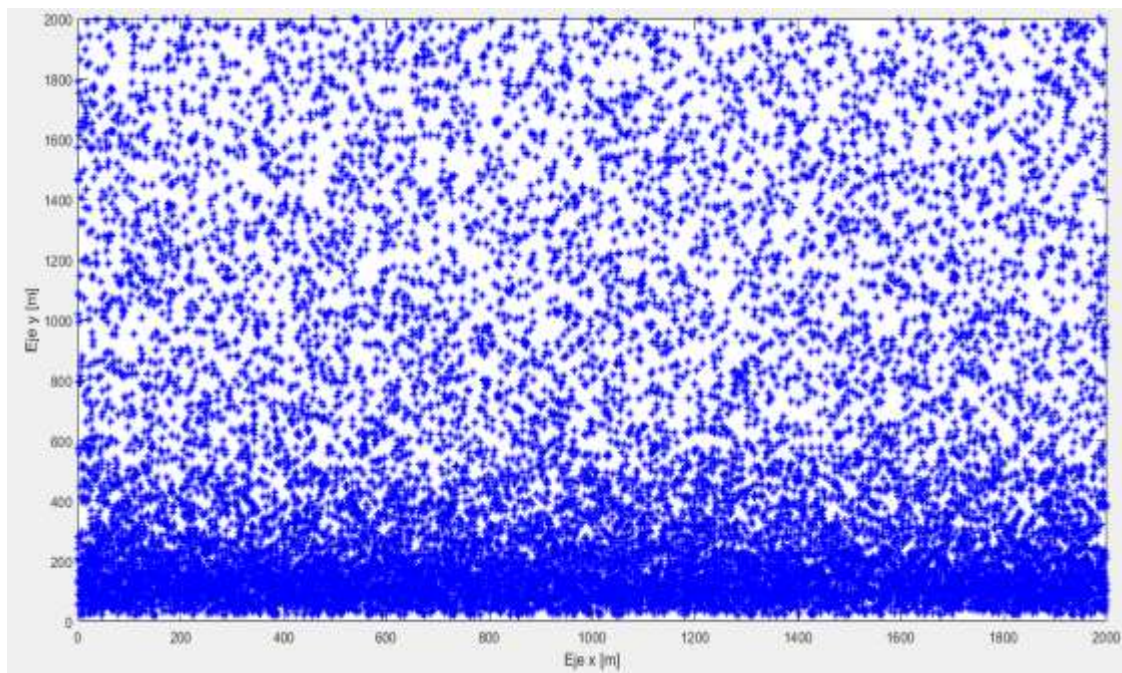
La figura 11 muestra el histograma de los impactos asignados por la técnica de muestreo estratificada. Se observa que la mayoría de los impactos se acumulan a 500 m de la línea. El histograma muestra una distribución uniforme ponderada con mayor peso en los subdominios más cercanos a la línea.

La figura 12 muestra como el error relativo va disminuyendo de forma exponencial decreciente, para calcular C_p y C_g se usaron las ecuaciones 3 y 7 respectivamente. Ambas se diferencian en la tasa de disminución y amplitud con C_p menor que C_g , una de las razones es porque C_g empieza a ser calculado a partir de la simulación 5,201 donde se tiene una estimación inicial de σ_j^2 con 104 eventos en cada subdominio por separado.

La figura 13 muestra la tasa de fallas F_p debido a impactos indirectos por rayos para el caso de la línea sencilla, aplicando la técnica de muestreo estratificada y sin la aplicación del método.

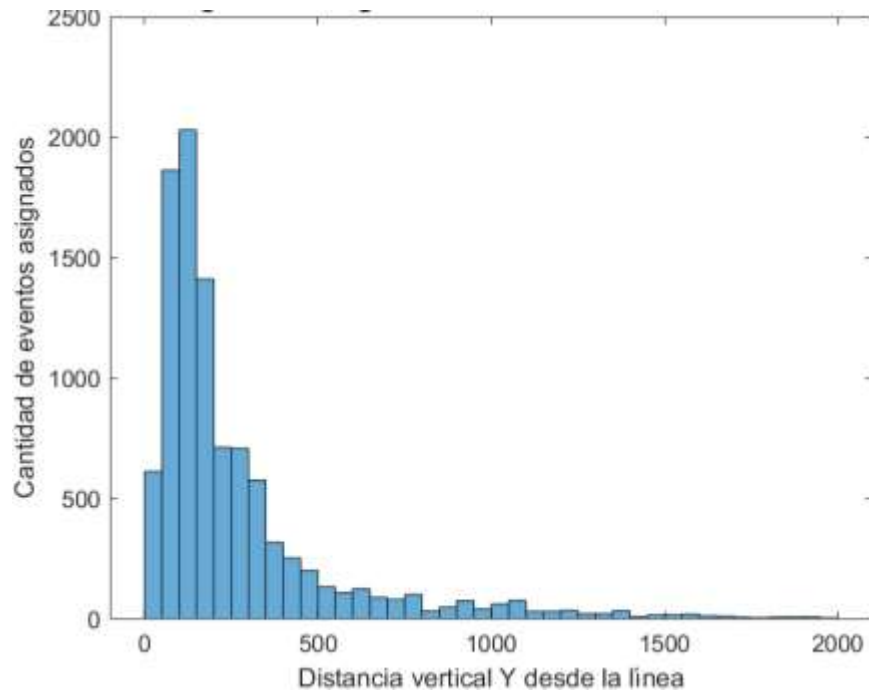
La diferencia se encuentra para CFO menores a 250 kV porque la técnica de muestreo estratificada asigna impactos en los subdominios más cercanos a línea donde se generan tensiones inducidas más grandes debido a la cercanía de la línea. La cantidad de eventos con tensiones que supera el $CFO_{\leq 250 \text{ kV}}$ es mayor para una misma cantidad de simulaciones n_{tot} .

Figura 10 Posición de los eventos generados por el muestreo estratificado con la línea ubicada sobre el eje x



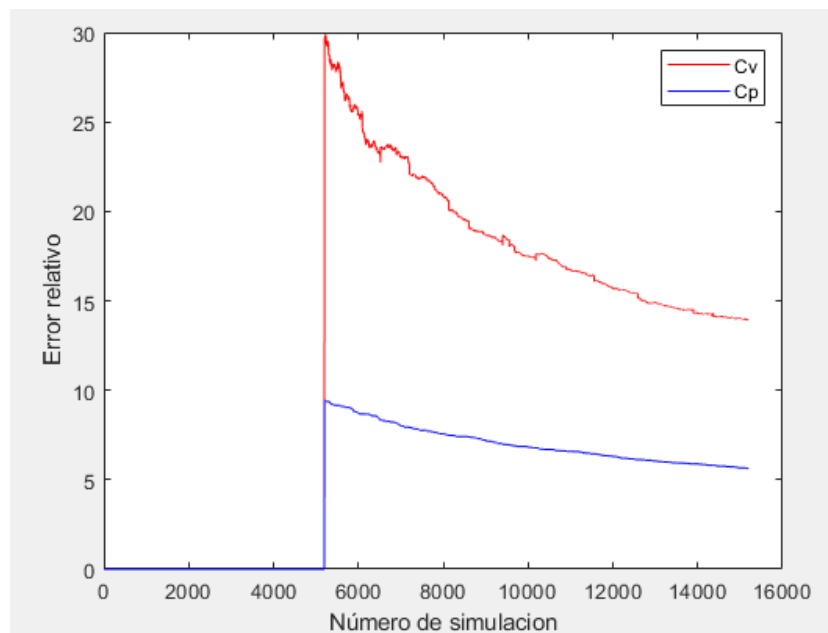
Nota. Elaboración propia.

Figura 11 Histograma de 10,000 eventos asignados por la técnica de muestreo en los subdominios



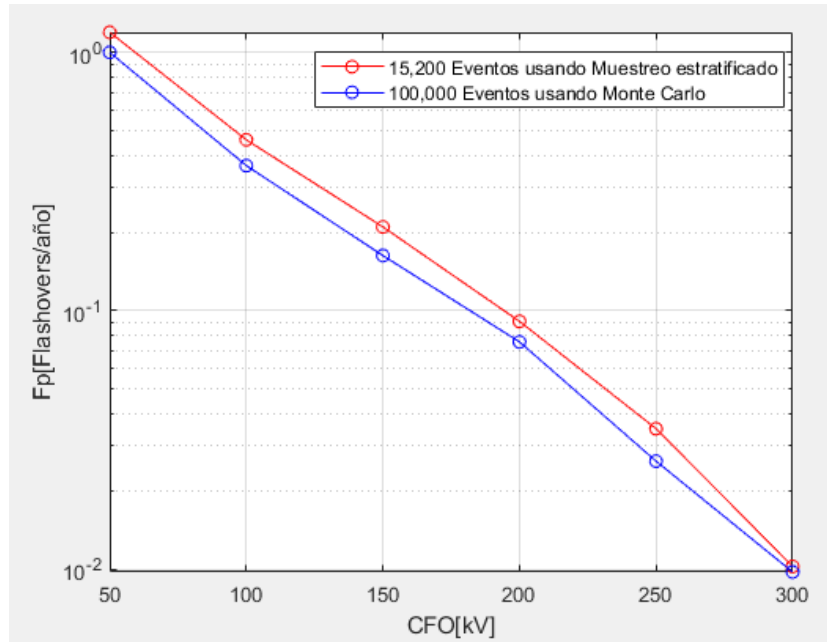
Nota. Elaboración propia

Figura 12 Comparación del error relativo obtenido por la técnica estratificada y Monte Carlo.



Nota. Elaboración propia

Figura 13 Comparación de tasa de fallas por impactos indirectos entre el muestreo estratificado y Monte Carlo



Nota. Elaboración propia.

5.3 Resultados de la tasa de fallas ante impactos indirectos para una red compacta

La estimación de la tasa de fallas es realizada aplicando el método de Monte Carlo. Los parámetros de la corriente de rayo siguen la distribución del (Cigré, 1991), (Eriksson, 1980) para la primera descarga negativa, con un coeficiente de correlación entre t_f y I_p igual a 0.47. Para el cálculo de las tensiones inducidas es usado el software YALUK DRAW (Ernesto, 2010) con una forma de onda tipo Heidler.

Los impactos que caen muy cerca de la línea son eliminados por ser impactos directos de acuerdo con el método de incidencia electro geométrico de Whitehead (IEEE Std 1410, 2004)

Se supone que las ubicaciones de los impactos son uniformemente distribuidas en el área de impacto, teniendo un tamaño lo suficientemente grande como para incluir todos los eventos del rayo que podría causar voltajes mayores que el valor mínimo de voltaje de interés para el

análisis.

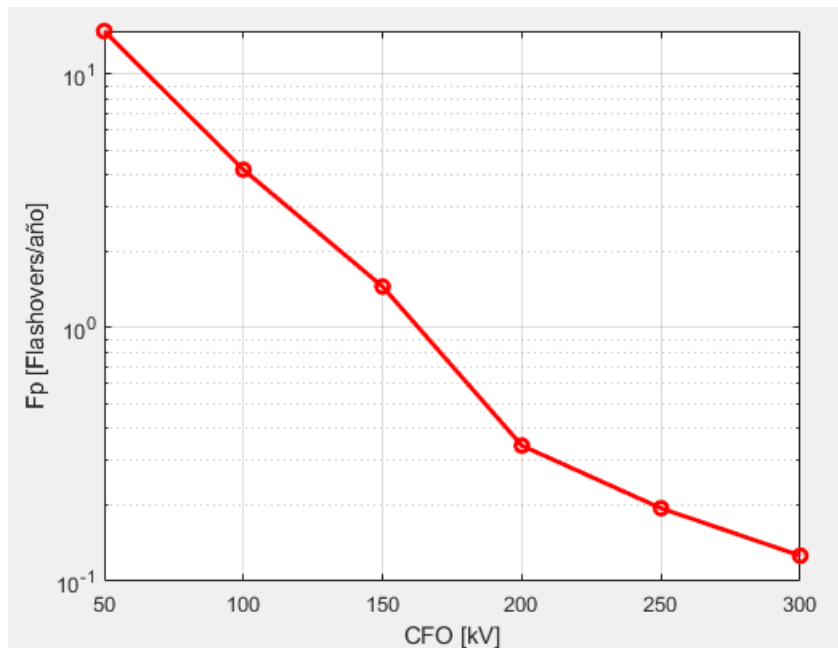
Con el número de impactos indirectos la tasa de fallas es expresada por una curva que muestra cuantos eventos generaron una tensión mayor que un nivel de aislamiento predeterminado (ecuación 2)

La longitud de la línea compacta es 1,400 m. Los resultados fueron obtenidos para una resistencia de puesta a tierra $R_g=20 \Omega$ y la conductividad del terreno igual a $\sigma_g=1 \text{ mS/m}$.

En los resultados presentados se realizaron 100,000 eventos de Monte Carlo. El número de eventos indirectos es 99,021 y los eventos directos es 979.

La figura 14 muestra los resultados obtenidos de la tasa de falla para una red compacta. Se muestra que para mayores niveles de aislamiento en la configuración compacta la cantidad de eventos que pueden causar un flameo son significativamente menores.

Figura 14 Tasa de fallas por impactos indirectos de una línea de distribución compacta con conductividad del terreno $\sigma_g=1 \text{ mS/m}$ y resistencia de puesta a tierra $R_g=20 \Omega$.



Nota. Elaboración propia.

5.4 Resultados de la tasa de fallas ante impactos directos para una red compacta

La tasa de fallas por flameo inverso BFR indica el número de fallas por impactos directos sobre la torre o el cable de guarda que producen flameos, se expresa en unidades de fallas por 100 kilómetro por año. La expresión del BFR considera que, de todos los impactos directos, los de la torre son los que pueden producir flameo en mayor medida porque las tensiones debido a impactos directos en cable de guarda son menores que las tensiones por impactos directos en la torre, esto se estima en 60% (Cigré, 1991).

$$BFR = 0.6 * N_l * P(I_c) \quad (10)$$

Donde,

N_l es la cantidad de rayos que impacta la estructura [impactos/100 km/año][15];

$P(I_c)$ es la probabilidad de que la corriente I_c sea excedida;

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

$$N_l = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + S_g}{10} \right) \quad (11)$$

Donde,

N_g Es la densidad de descargas a tierra por unidad de superficie en un cierto lugar geográfico en [rayos/km²/año];

h es la altura de la torre en [m];

S_g es la distancia entre cables de guarda en [m].

$$P(I_c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_c}{31}\right)^{2.6}} \quad (12)$$

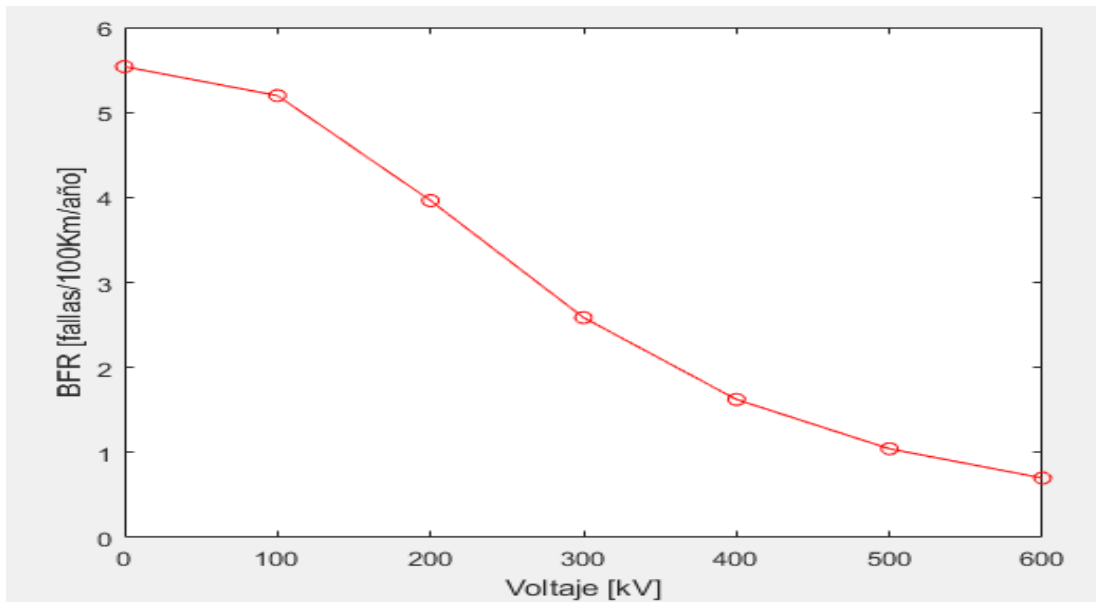
Donde, I_c es la corriente crítica a la cual ocurre un flameo (la tensión en la torre supera el nivel de aislamiento) [kA].

Para el cálculo de la corriente crítica fue empleado el software de simulación ATP DRAW Como se muestra en la figura 15.

La figura 15 muestra el circuito empleado conectado a una resistencia de puesta a tierra de 20Ω y conductividad del terreno $\sigma_g = 1 \text{ mS/m}$.

En la figura 16 inicialmente se encuentra el punto de tensión justo antes de ocurrir un flameo y el tiempo al cual ocurre para una corriente del rayo “Slope-Ramp type 13” con tiempo de frente $1.2 \mu\text{s}$ y amplitud máxima de 32 kA. La tensión responsable del flameo corresponde a 382.40 kV en un tiempo de $1.08 \mu\text{s}$, con este tiempo se busca el punto de intersección con la curva de tensión soportada (figura 3) y corresponde a 458.09 kV. La división entre estos dos valores permite obtener la corriente crítica que es 1.19 A, y a su vez se remplazó en la (ecuación 12) obteniendo la probabilidad de que la corriente I_c sea excedida, dando como resultado 100 %. Después, teniendo en cuenta una densidad de rayos en la zona de 1 rayo/km²/año se obtiene la cantidad de rayos que impactan la estructura (ecuación 10), que es 5.5374 %.

En la figura 17 se grafica la tasa de fallas por flameo inverso en función del voltaje de aislamiento, para bajos niveles de aislamiento la corriente crítica tiene una alta probabilidad de generar una falla. El BFR con voltajes menores a 100 kV no varía mucho, a partir de 100 kV empieza disminuir la tasa de fallas por flameo inverso.

Figura 17. Tasa de fallas por impactos directos para la línea de distribución compacta

Nota. Elaboración propia.

6. Conclusiones

Para los resultados obtenidos en este documento, obtención del índice de fallas en líneas de distribución compactas ante impactos directos e indirectos de rayos se concluye que.

En impactos indirectos se genera tensión inducida en el conductor mensajero (M) que depende de la resistencia a tierra (R_f).

En impactos directos al conductor mensajero (M) se genera una tensión en los conductores L, D, R que tienen la misma forma de onda del conductor mensajero (M) pero con menor amplitud, teniendo su mayor diferencia de amplitud en el valor pico de la onda de tensión.

La técnica de muestreo estratificada asigna los impactos a tierra en zonas con mayor varianza donde las tensiones inducidas presentan mayor diferencia en su amplitud, pero no reduce el error relativo C_g lo suficientemente bajo para alcanzar a C_p .

Para impactos indirectos las redes compactas con bajo nivel de CFO presentan mayor cantidad de flameos en comparación de altos niveles de CFO.

Para impactos directos la probabilidad de que se exceda la corriente crítica es alta debido a que la curva de tensión soportada en líneas compactas (figura 3) no tiene una amplitud lo suficientemente alta para soportar corrientes de rayos altas.

Referencias Bibliográficas

- A. Borghetti, F. N. (2019). "Lightning-Originated Overvoltages in a Multi-Circuit HV-MV Line", PowerTech 2019 IEEE Milan. *pp. 1-6*.
- A. Borghetti, F. N. (2019). Piantini, "Lightning-Originated Overvoltages in a Multi-Circuit HV-MV Line", PowerTech 2019 IEEE Milan, pp. 1-6, 2019.
- A. Borghetti, G. M. (2018). "Lightning protection of a compact MV power line sharing the same poles of a HV Line," in Proc. 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP). *pp. 1-7*.
- Brandimarte, P. (2014). Handbook in Monte Carlo Simulation: Applications in Financial Engineering, Risk Management, and Economics. Hoboken,.
- C. A. Nucci, F. R. (1993, pp. 75-86). "Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines," IEEE Trans. *Electromagn. Compat., vol. 35, no. 1*.
- Cigré. (1991). Working Group "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRE, Paris, 1991*.
- Eriksson, R. B. (1980). Lightning parameters for engineering applications," ELECTRA, vol. 69, pp. 65-102, 1980.
- Ernesto, a. S. (2010). Universidad Nacional – Sede Manizales. 2010.
- F. Napolitano, F. T. (2018). Lightning Performance Assessment of Power Distribution Lines by means of Stratified Sampling Monte Carlo Method," IEEE Trans. Power Deliv.
- Heidler, F. (1985). "Analytische blitzstromfunktion zur LEMP-berechnung. in Proc. 18th Int. Conf. *Lightning Protection, Munich, Germany*.

- IEEE Std 1410. (2004). IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines,” IEEE Std 1410-2010 (Revision IEEE Std 1410-2004). pp. 1–73, 2011.
- K. Nakada, H. S. (2003). *Experimental facility for investigation of lightning performance of distribution lines*. IEE Trans. Power Deliv., vol. 18 no. 1, pp. 253-257, 2003.
- Kawamura, A. a. (2005). *A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP*. IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 2, pp. 867–875, 2005.
- M. A. Uman and D. K. Mclain. (1969, vol. 74, no. 28, pp. 6899–6910, 1969.). Magnetic field of lightning return stroke. *J. Geophys. Res.*
- Wareing, J. B. (2005). *Covered Conductor Systems for Distribution (EA report)*,.