

ESTIMACIÓN DE LA TASA DE FALLAS ANTE RAYOS

1

ESTIMACIÓN DE LA TASA DE FALLAS ANTE RAYOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN
INCORPORANDO EL MÉTODO DE

Comas Echeverría, Sergio Alexander y Suárez Gómez, Jorge Andrés

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Edison Andrés Soto Ríos

Doctor en ingeniería eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

Contenido

	Pág.
Introducción	7
1. Objetivos	10
1.1. Objetivo general	10
1.2 Objetivos específicos	10
2. Metodología	11
2.1 Cálculo de tensiones inducidas por rayos	11
2.2 Cálculo de la tasa de fallas	12
2.3 Método <i>DE</i>	14
3. Parámetros de Simulación	15
3.1. Red simplificada en zona templada	15
3.2 Red multiconductora en zona tropical	16
4. Tensiones inducidas para las redes analizadas	19
4.1 Tensiones inducidas para la red simplificada	19
4.2 Tensiones inducidas para la red multiconductora	21
5. Tasa de falla de la red simplificada en zona templada	23
6. Tasa de fallas de la red multiconductora en zona templada y tropical	25
6.1 Tasa de fallas zona templada	26
6.2 Tasa de fallas zona tropical	27
6. Conclusiones	28
Referencias Bibliográficas	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Configuración geométrica de la red bajo estudio.	17
Figura 2. Corriente en la base de canal De Conti.	20
Figura 3. Tensiones inducidas producida por el rayo en el centro de la red para la corriente en la base del canal mostrada en la Fig. 2.	21
Figura 4. Corriente en la base de canal en zona tropical.	22
Figura 5. Tensiones inducidas por el rayo en el centro de la red para las corrientes de base del canal mostrada en la Fig. 4.	23
Figura 6. Tasa de fallas de una red aérea de 1,2 km de longitud con una conductividad del suelo de 0,01 S/m.	24
Figura 7. Tasa de fallas de red para zona templada con una conductividad del suelo de 0,001 S/m.	26
Figura 8. Tasa de fallas de red de estudio 1.84 km de longitud asumiendo una conductividad del suelo de 0.001 S/m.	27

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de simulación método DE para la red simplificada	15
Tabla 2. Parámetros de la Distribución de Probabilidad log-normal para la primera descarga de retorno en descargas negativas adoptados por CIGRÉ	16
Tabla 3. Parámetros de simulación método DE para la red bajo estudio	18
Tabla 4. Parámetros del rayo zona tropical.....	18

Resumen

Título: Estimación de la tasa de fallas ante rayos en redes de distribución incorporando el método DE*.

Autor: Comas Echeverría, Sergio Alexander y Suárez Gómez, Jorge Andrés**

Palabras Clave: flameo, tasa de fallas.

Descripción:

Este artículo investiga la influencia de considerar las curvas de voltaje-tiempo del aislamiento tanto en el cálculo de los voltajes inducidos por rayos como en la estimación del número de fallas que una red aérea puede experimentar por año debido a impactos cercanos en zonas tropicales de Colombia. El desempeño de la red se obtiene modelando el mecanismo de falla del aislamiento con el método de integración DE y el criterio simplificado de flameo de 1.5-CFO. Se utiliza el procedimiento de Monte Carlo junto con un software especializado, de acuerdo al estándar IEEE 1410. Los resultados obtenidos sugieren que el criterio simplificado de flameo de 1.5-CFO subestima la cantidad de fallas que la red aérea bajo estudio puede experimentar por año en zonas tropicales y zonas templadas como se ha presentado en la literatura. También se sugiere que se pueden obtener estimaciones más realistas de la tasa de fallas usando un nivel de umbral reducido (1.2 veces del CFO) en lugar del nivel de 1.5 veces el CFO que se usa tradicionalmente en este tipo de estudios.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Edison Andrés Soto Ríos Doctor en ingeniería eléctrica

Abstract

Title: Estimación de la tasa de fallas ante rayos en redes de distribución incorporando el método DE*.

Authors: Comas Echeverría, Sergio Alexander y Suárez Gómez, Jorge Andrés**

Key Words: flashover, flashover rate.

Description: This paper investigates the influence of considering insulation voltage-time curves in the calculation of lightning-induced voltages and in the estimation of the number of flashovers that an overhead line may experience per year due to nearby impacts in tropical areas of Colombia. Line performance is obtained by modeling the insulation flashover mechanism with the DE integration method and the simplified 1.5-CFO flashover criterion. The Monte Carlo procedure is used together with specialized software, according to IEEE 1410 standards. The results obtained suggest that the simplified 1.5-CFO flashover criterion underestimates the number of flashovers that the overhead line under study may experience per year in tropical and temperate zones as presented in the literature. It is also suggested that more realistic flashover rate estimates can be obtained using a reduced threshold level (1.2 times CFO) rather than the 1.5 times CFO level traditionally used in such studies.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Edison Andrés Soto Ríos Doctor en ingeniería eléctrica

Introducción

Los impactos de rayos a tierra en cercanías a redes aéreas de distribución, constituyen un problema importante para estas redes debido a la alta frecuencia con que ocurren (Eriksson, Stringfellow, & Meal, 1982) (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) Las tensiones inducidas provocadas por estos impactos pueden causar daños en el sistema eléctrico y en las cargas conectadas a ésta. A causa de esto, se han propuesto diferentes modelos para obtener las tensiones inducidas generadas por impactos indirectos (Wagner & McCann, 1942) (Diendorfer, 1990) (Agrawal & Price, 1980) (Nucci, Rachidi, Ianoz, & Mazzetti, 1993) (Rusck, 1958) (Chowdhuri & Gross, 1969). Adicionalmente, en la literatura se han reportado metodologías para obtener el desempeño de las redes de distribución ante rayos, como curvas que relacionan la cantidad de flameos por año en función de la tensión crítica de flameo (CFO) (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) (IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2004) (Chowdhuri, 1989). Estas curvas, se obtienen suponiendo que se producen fallas en algún punto de la red de distribución, siempre que la tensión inducida calculada en ese punto supere un cierto nivel de umbral. Este nivel es definido por el estándar IEEE 1410 como el CFO de la red multiplicado por un factor de 1.5, lo cual representa el aumento en la curva de voltaje-tiempo que caracteriza el aislamiento de la red (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) (IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2004). El criterio 1.5- CFO, en la estimación de flameos, puede dar lugar a diferencias en el cálculo de la tasa de fallas, puesto que se descarta la influencia de la forma de onda de la tensión inducida en la ocurrencia del flameo (De Conti, y otros, 2010) (Darveniza & Vlastos, 1988).

Para estimar mejor el mecanismo de falla del aislamiento, en la literatura se ha propuesto el uso del método *DE* (disruptive effect, o en español, efecto disruptivo), con el fin de mejorar la estimación de la tasa de fallas, al considerar las curvas reales de voltaje-tiempo del aislamiento y estimar el desempeño del aislamiento de la red cuando se somete a formas de onda de voltaje no estándar (De Conti, y otros, 2010) (Darveniza & Vlastos, 1988). En (De Conti, y otros, 2010) se aplicó el método *DE* para modelar el aislamiento de una red de distribución monofásica ubicada en zona templada, es decir usando los parámetros del rayo recomendados por CIGRÉ (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980) y diferentes conductividades del suelo. Se encontró que el criterio de 1.5-CFO tendía a subestimar la tasa de fallas de la red, por lo que se requerían niveles más bajos (1.1 a 1.4 dependiendo de la conductividad).

En zona tropical se han medido experimentalmente corrientes de rayos y se han obtenido los parámetros de las distribuciones de probabilidad de corriente (Visacro, Mesquita, De Conti, & Silveira, 2012) (Visacro, Soares J., Schroeder, Cherchiglia, & Souza, 2004) (Silveira & Visacro, 2020) con valores más elevados que los de zona templada (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980). Algunos trabajos han mostrado el desempeño de redes monofásicas de distribución ubicadas en zona tropical (Soto, Pérez, & Del Río, 2017), evidenciándose un incremento como efecto de los parámetros del rayo más elevados. Hasta ahora, no se han realizado, estudios de redes de distribución más realistas en zonas tropicales y que a su vez consideren el modelo del aislamiento con un criterio distinto al tradicional 1.5-CFO. En consecuencia, este artículo tiene como objetivo estimar y comparar el desempeño de una red trifásica ubicada en zona tropical, usando el criterio 1.5-CFO y del método *DE* utilizando los parámetros del rayo en zona tropical.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección II se presenta la metodología del artículo, en la sección III se definen los parámetros de simulación, la sección IV muestra las tensiones inducidas obtenidas. La sección V presenta el cálculo de la tasa de fallas de una red simplificada en zona templada. En la sección VI se obtiene la tasa de fallas de una red multiconductora para zona templada y zona tropical. Finalmente, en la Sección VII se presentan las conclusiones del trabajo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Incorporar el método de integración (método DE) para modelar el desempeño del aislamiento en redes de distribución y verificar el comportamiento de la tasa de fallas de estas redes ante rayos.

1.2 Objetivos específicos

- Incorporar en redes de distribución en media tensión el método de integración o método DE (disruptive effect, o en español, efecto disruptivo) para modelar el comportamiento del aislamiento de redes de distribución en media tensión.
- Comparar la tasa de fallas de una red de distribución al usar un aislamiento constante y empleando el método DE.
- Analizar el desempeño de una red de distribución con base en la implementación del objetivo anterior tanto para zonas templadas como tropicales.

2. Metodología

2.1 Cálculo de tensiones inducidas por rayos

Las tensiones inducidas se calculan de la siguiente manera (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) (IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2004):

- Se escoge la forma de onda de la corriente del rayo en la base del canal, describiendo ésta a través de un modelo que especifica la distribución espacio-temporal a lo largo del canal. En este artículo se usará el modelo modificado de línea de transmisión con crecimiento exponencial (MTLE).
- Se calcula el campo electromagnético mediante las ecuaciones de Master y Uman (Uman, McLain, & Krider, 1975) para terreno plano. Cuando se tiene conductividad finita se usan las aproximaciones de Cooray-Rubinstein (Cooray, 1992) (Rubinstein, 1996).
- Finalmente, la tensión de acople campo-red de distribución se obtiene usando el modelo de acople de Agrawal (Agrawal & Price, 1980). Dicho método ha mostrado ser el más preciso para hacer este tipo de cómputo en redes aéreas.

Los cálculos realizados en este artículo se llevan a cabo usando el software Yaluk Draw (Pérez & Soto, Software. Yaluk Draw., 2010) (Pérez & Soto, 2013) que permite calcular la tensión inducida siguiendo los pasos previos, con una interfaz gráfica que permite incluir elementos tales como resistores, capacitores, descargadores de sobretensión entre otros.

2.2 Cálculo de la tasa de fallas

La evaluación de la probabilidad de flameo generada por rayos indirectos utiliza el procedimiento definido en el estándar IEEE 1410 (IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2004), basado en el uso del método de Montecarlo y un software (Yaluk Draw (Pérez & Soto, Software. Yaluk Draw., 2010) (Pérez & Soto, 2013) que permita calcular las tensiones inducidas:

1. Se genera aleatoriamente un gran número de impactos (n_{tot}). Cada uno de estos se caracterizan por cuatro parámetros: La corriente pico I_p , el tiempo de frente t_f y la ubicación del impacto dada por las coordenadas (X, Y). Los parámetros I_p y t_f siguen las distribuciones de probabilidad log-normal de corrientes de primera descarga de retorno adoptadas por CIGRÉ (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980), existiendo un factor de correlación de 0.47 entre ambos parámetros. (para el análisis en zona tropical, la distribución de probabilidad de I_p y t_f seguirán los actualizados para la zona). Se establece que la ubicación del impacto se distribuye uniformemente dentro de un rango máximo de 2 km de distancia de la red (en el caso de conductividad finita) para considerar todos los posibles impactos indirectos que pueden generar tensiones inducidas que superen el CFO de la red

2. Del total de eventos generados, aquellos que se ubican a una distancia igual o inferior a (d_{min}) de la red se clasifican como descargas directas de rayo y no se incluyen en el cálculo de flameos inducidos por descargas indirectas. La distancia $d_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}$ se obtiene del modelo electrogeométrico (Soto, Pérez, & Del Río, 2017) (SC 33 Working Group 33.01, 1991) (IEEE Working Group, 1990) (IEEE Working Group on Estimation Lightning Performance of

Transmission Lines, 1985), donde h es la altura de la red, $r_s = 10I_p^{0,65}$ y $r_g = 0,9r_s$. Donde r_s es la distancia de impacto en m, r_g es la distancia de impacto a tierra (m) e I_p es la corriente pico del rayo (kA).

3. Para cada evento de rayo indirecto, los voltajes inducidos se calculan mediante el programa *YalukDraw* (Pérez & Soto, Software. Yaluk Draw., 2010) (Pérez & Soto, 2013). La tasa de fallas se calcula haciendo uso de la siguiente expresión:

$$FP = f_{sim} \times \frac{n}{n_{tot}} \times n_g \times A_t \quad (1)$$

Donde f_{sim} es el factor de simetría dependiente de la porción alrededor de la red en donde se han simulado los impactos (Soto, Perez, & Rio, 2022), n_{tot} es el número total de simulaciones, N_g es la densidad de descargas a tierra (rayos/km²/año), A_t es el área de incidencia de las descargas y n es el número de eventos que se consideran como de flameo. En la metodología tradicional propuesta en (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007) y adoptada por la IEEE 1410 (IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2004) y, n es simplemente el número de eventos con una sobretensión superior al CFO de la red. En el método *DE*, n se cuenta si existe corte en la forma de onda de la tensión, de acuerdo a los criterios que se explicarán en la próxima sección.

Para este caso el valor tomado para el factor de simetría f_{sim} tiene como objetivo obtener mayor precisión en los datos de la tasa de fallas. La densidad de descargas a tierra N_g se asume unitaria con el fin de comparar los resultados entre las diferentes zonas de estudio.

2.3 Método *DE*

Tradicionalmente en la literatura, se ha considerado que un flameo ocurre cuando el nivel de voltaje en un punto dado excede el CFO de la red multiplicado por 1.5, que pretende dar cuenta del aumento en la curva de voltaje-tiempo que caracteriza el aislamiento de la red. En este enfoque simplificado, la ocurrencia de fallas no depende de la forma del voltaje inducido. Por el contrario, en el enfoque dado por el método *DE*, se puede estimar el desempeño del aislamiento de la red cuando se somete a formas de onda de voltaje no estándar. El método de integración *DE* es función de la forma de la onda de voltaje incidente de acuerdo con:

$$DE = \int_0^t [U(t) - U_0]^k dt, \text{ for } U(t) > U_0 \quad (2)$$

Donde:

- *DE* es el denominado efecto disruptivo.
- $U(t)$ es la tensión incidente.
- U_0 es la tensión de inicio por encima de la cual se inicia la etapa de preflameo en el aislador.
- k es un factor adimensional. k y U_0 son obtenidos de pruebas a los aisladores.
- t_0 es el momento en que $U(t) > U_0$ (De Conti, y otros, 2010).

Se establece que el flameo ocurre cuando $DE > DE^*$, donde DE^* se define como el efecto disruptivo crítico, obtenido de ensayos de laboratorio (De Conti, y otros, 2010).

Este enfoque se implementó en el software ATP Draw mediante un modelo en el que se programó la ecuación (1). Para este nuevo modelo de flameo, se asume que los interruptores

ideales que representan los aisladores de la red están controlados por el método de integración (De Conti, y otros, 2010) (Darveniza & Vlastos, 1988).

3. Parámetros de Simulación

3.1. Red simplificada en zona templada

El sistema simulado consiste en un cable aéreo de 1.2 km de longitud, 8.4 m de altura y 1 cm de radio, conectado a su impedancia característica en ambos extremos. Se consideraron 17 postes en concreto, lo que resulta en vanos de 75 m. Los aisladores de red se representaron como interruptores ideales. Por simplicidad, se despreció la ionización del suelo. La distribución espacial y temporal de la corriente de retorno se modeló por medio del modelo de red de transmisión modificado con decaimiento exponencial (MTLE) con una constante de atenuación de 2000 m y una velocidad de propagación de $1.3 * 10^8$ m/s. La conductividad del suelo se supone de 0.01 S/m.

Los parámetros de simulación para el método *DE* se escogen de acuerdo a los presentados en (De Conti, y otros, 2010) y se muestran en el cuadro 1:

Tabla 1.

Parámetros de simulación método DE para la red simplificada

CFO (kV)	U0/CFO	k	DE*/CFO
35	0.93	1	0.266×10^{-6}
100	0.9	1	0.609×10^{-6}

Nota. Tomado de: (De Conti, y otros, 2010)

Los parámetros de la distribución de probabilidad log-normal para la primera descarga de retorno en descargas negativas adoptados por CIGRÉ (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980), y que se asumen en este artículo como para zona templada, se muestran en el cuadro 2:

Tabla 2.

Parámetros de la Distribución de Probabilidad log-normal para la primera descarga de retorno en descargas negativas adoptados por CIGRÉ

Parámetro	Mediana (kA)		Desviación Estándar (kA)	
	$I_p \leq 20kA$	$I_p 20kA$	$I_p \leq 20kA$	$I_p 20kA$
I_p	61	33.3	1.33	0.605
t_f (μs)	3.83		0.553	

Nota. Tomado de: (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980),

Este caso, los valores de la ecuación (1) se asumen:

$$f_{sim} = 1$$

$$A_t = 10,93 km^2$$

$$n_{tot} = 25.000 \text{ simulaciones}$$

La densidad de descargas a tierra N_g se asume unitaria, lo cual permite escalar la tasa de fallas para cualquier valor de DDT en cualquier zona de estudio.

3.2 Red multiconductora en zona tropical

El sistema consiste de una red trifásica aérea, ubicada en Cimitarra, Santander, Colombia (Ardila, Soto, & Velandia, 2021), con una longitud de 1,84 km, 14,8 m de altura y conductores

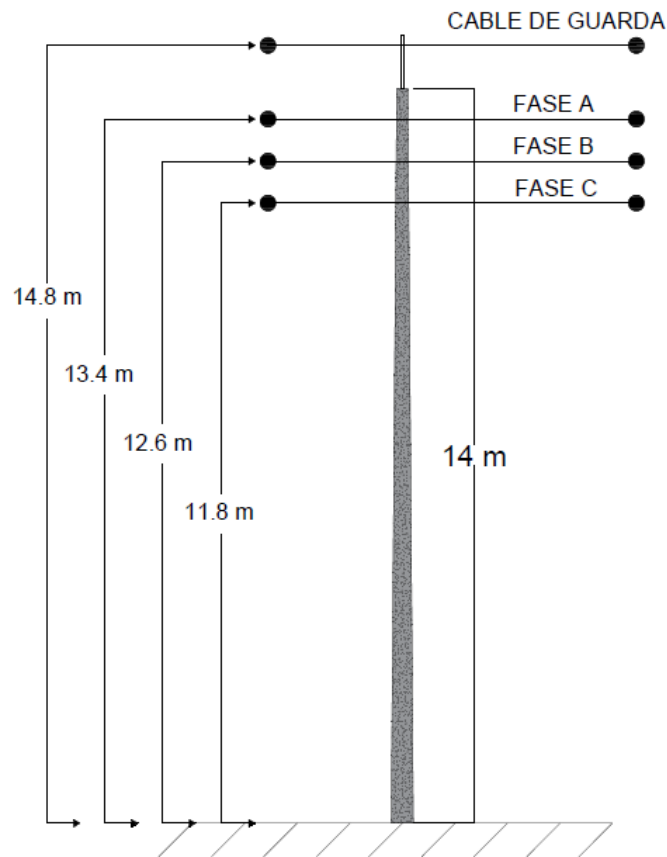
ESTIMACIÓN DE LA TASA DE FALLAS ANTE RAYOS

17

con un radio de 7 mm para las fases y 5 mm para el cable de guarda, conectado a su impedancia característica en ambos extremos. Se sujetan con aisladores de porcelana clase AN SI C29 – 7 (GAMMA , 2018) a una altura de 13.4 m (fase superior), 12.6 m (fase media), 11.8 m (fase inferior) y 14.8 m (cable de guarda) sobre el nivel del suelo, como se muestra en la Fig. 1. Se consideraron 24 postes en concreto, lo que resulta en vanos de 80 m. Se usa también el modelo MTLE con una constante de atenuación de 2000 m y una velocidad de la descarga de retorno de $1.3 * 10^8$ m/s. La conductividad del suelo en este caso se supone de 0.001 S/m y se realizan simulaciones tanto para zona templada como para tropical (NC - RA1 - 401, s.f.).

Figura 1.

Configuración geométrica de la red bajo estudio.



Nota. Tomado de: (NC - RA1 - 401, s.f.)

Los parámetros de simulación para el método *DE* se escogen de acuerdo a los valores típicos de CFO de la red bajo estudio (100, 140 y 179 kV). Estos se muestran en el cuadro 3:

Tabla 3.

Parámetros de simulación método DE para la red bajo estudio

CFO (kV)	U0/CFO	k	DE*/CFO
100	0.9	1	0.609 x 10 ⁻⁶
140	0.8384	1	1.185 x 10 ⁻⁶
179	0.7784	1	1.7466 x 10 ⁻⁶

Nota. Tomado de: (De Conti, y otros, 2010)

Los parámetros para zona tropical son tomados del artículo (Visacro, Mesquita, De Conti, & Silveira, 2012) (Visacro, Soares J., Schroeder, Cherchiglia, & Souza, 2004), y actualizados con la referencia (Silveira & Visacro, 2020), según se ve en el cuadro 4:

Tabla 4.

Parámetros del rayo zona tropical

parámetro	Mediana (kA)	Desviación estándar (kA)
I_p	43,3	0,47
t_f (μ s)	4,2	0,5

Nota. Tomado de: (Visacro, Mesquita, De Conti, & Silveira, 2012) (Visacro, Soares J., Schroeder, Cherchiglia, & Souza, 2004) (Silveira & Visacro, 2020)

Este caso, los valores de la ecuación (1) se asumen:

$$f_{sim} = 4$$

$$A_t = 2.92 \text{ km}^2$$

$$n_{tot} = 25.000 \text{ simulaciones}$$

$$N_g = 1$$

4. Tensiones inducidas para las redes analizadas

En los análisis estadísticos realizados para obtener la tasa de fallas por rayos de redes aéreas, la corriente del rayo se escoge por simplicidad ascendiendo linealmente hasta alcanzar su valor máximo y su amplitud permanece constante en adelante (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007). Esto permite realizar cálculos con mayor facilidad, sin embargo, la corriente utilizada para estos análisis deja de lado una característica de las corrientes de la primera descarga de retorno negativa, como es la pronunciada concavidad en el ascenso de la corriente al pico máximo (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007), (Visacro, Soares J., Schroeder, Cherchiglia, & Souza, 2004), (Anderson & Eriksson, 1980).

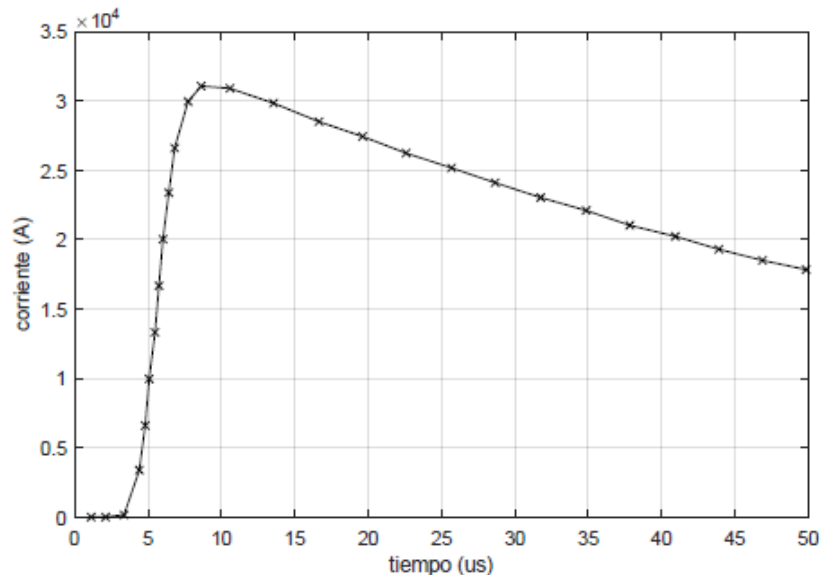
4.1 Tensiones inducidas para la red simplificada

Con el objetivo de comprobar la influencia de la forma de onda de la corriente en la obtención del flameo de la red simplificada, se reprodujeron los resultados obtenidos en la sección III de (De Conti, y otros, 2010), donde se ilustra el voltaje inducido para una red con iguales características a la de la red simplificada presentada en la sección 3.1, utilizando el método *DE* para modelar los aisladores de la red y la ruptura del aislamiento con los parámetros descritos en el cuadro 1.

Se hace uso de una corriente que se representa como la suma de seis funciones de Heidler, como se describe en (De Conti, y otros, 2010), con un valor máximo de 31,1 kA y una tasa de ascenso de $24.3 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Esta se muestra en la Fig. 2. Se considera un impacto equidistante a las terminaciones de red y que está a 120 m del centro de la misma. Se supone, en este caso, una conductividad de tierra de 0.002 S/m y un CFO de 100 kV.

Figura 2.

Corriente en la base de canal De Conti.



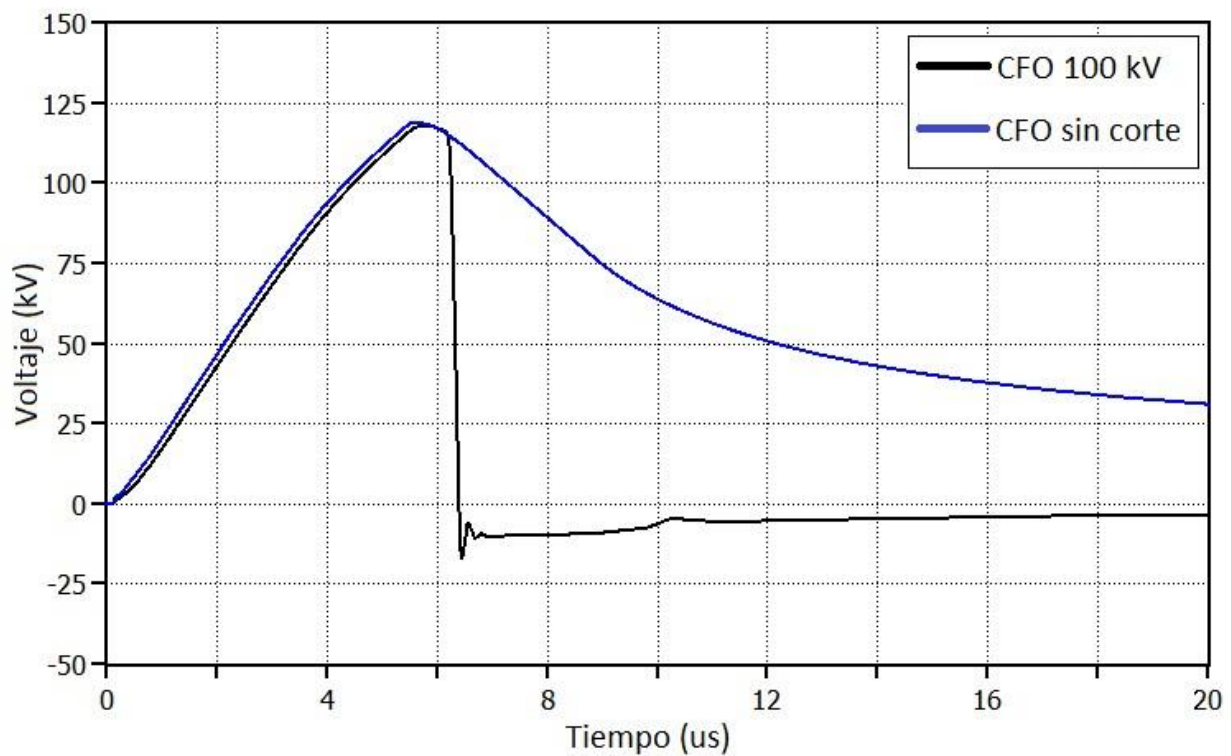
Nota. Tomado de: (De Conti, y otros, 2010)

La tensión inducida resultante se observa en la Fig. 3. Se puede ver que alcanza un valor máximo de 118 kV y se produce la ruptura del aislamiento por efecto del área pasados los 6 μs . Se evidencia que el flameo ocurre a un valor menor de la tensión pico, aproximadamente a 1.1 veces el CFO (100 kV) de la red. Esto muestra que el efecto de usar una forma de onda más realista y un método más elaborado para modelar el aislamiento de la red, es el de bajar el umbral de CFO al

que se puede producir flameo (1.1) en comparación al criterio tradicional de 1.5-CFO. Esto coincide con los resultados encontrados en (De Conti, y otros, 2010)

Figura 3.

Tensiones inducidas producida por el rayo en el centro de la red para la corriente en la base de la canal mostrada en la Fig. 2.



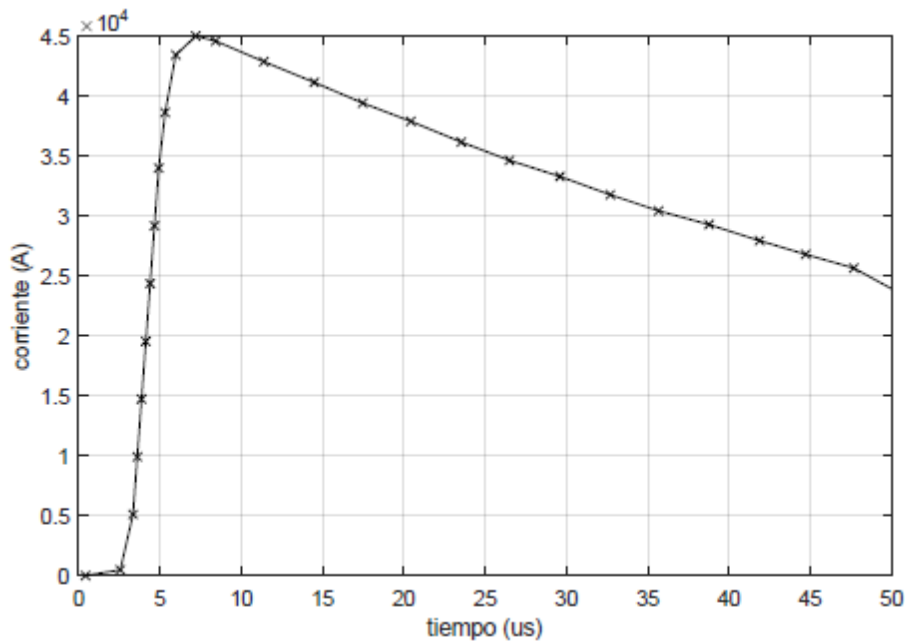
4.2 Tensiones inducidas para la red multiconductora

Ahora, se aplica el modelo DE para caracterizar el aislamiento de la red multiconductora con una corriente típica de zona tropical. En este caso se obtendrá el voltaje inducido considerando un impacto equidistante de las terminaciones de la red y ubicado a 180 m del centro de la red. Se

hace uso de una corriente que se representa como una función de Heidler con los siguientes parámetros: $I_p = 45 \text{ kA}$, $\tau_{11} = 4.2 \mu\text{s}$, $\tau_{12} = 70 \mu\text{s}$ y $n_1 8.2$ (fig. 4). Estos parámetros corresponden a la mediana de los valores en zona tropical (Visacro, Mesquita, De Conti, & Silveira, 2012) (Visacro, Soares J., Schroeder, Cherchiglia, & Souza, 2004) (Silveira & Visacro, 2020). Se supuso una conductividad de tierra de 0,001 S/m y un CFO de 179 kV).

Figura 4.

Corriente en la base de canal en zona tropical.

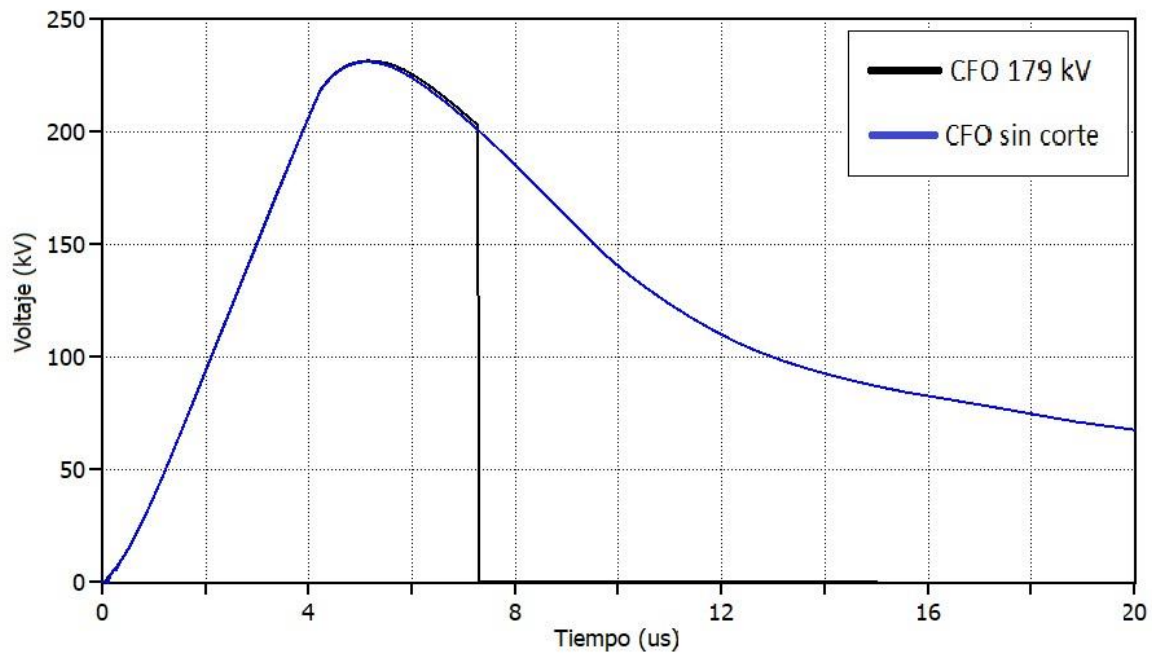


La tensión inducida se muestra en la Fig. 5. Esta alcanza un valor máximo de 230 kV. La tensión inducida presenta un valor elevado, comparado con el obtenido en la sección 4 dado que la corriente simulada tiene una corriente pico de 45 kA. La ruptura del aislamiento, al considerar el método *DE*, se produce al superar ligeramente los 200 kV. Esto corresponde a 1.1 veces el valor del CFO. Es posible notar que cuando se toman corrientes de rayo de zona tropical, se observa un

comportamiento similar que en zona templada: se requiere de un factor menor al tradicional 1.5-CFO para considerar el fallo del aislamiento o en otras palabras el criterio tradicional subestima la estimación del flameo en la red.

Figura 5.

Tensiones inducidas por el rayo en el centro de la red para las corrientes de base de la canal mostrada en la Fig. 4.



5. Tasa de falla de la red simplificada en zona templada

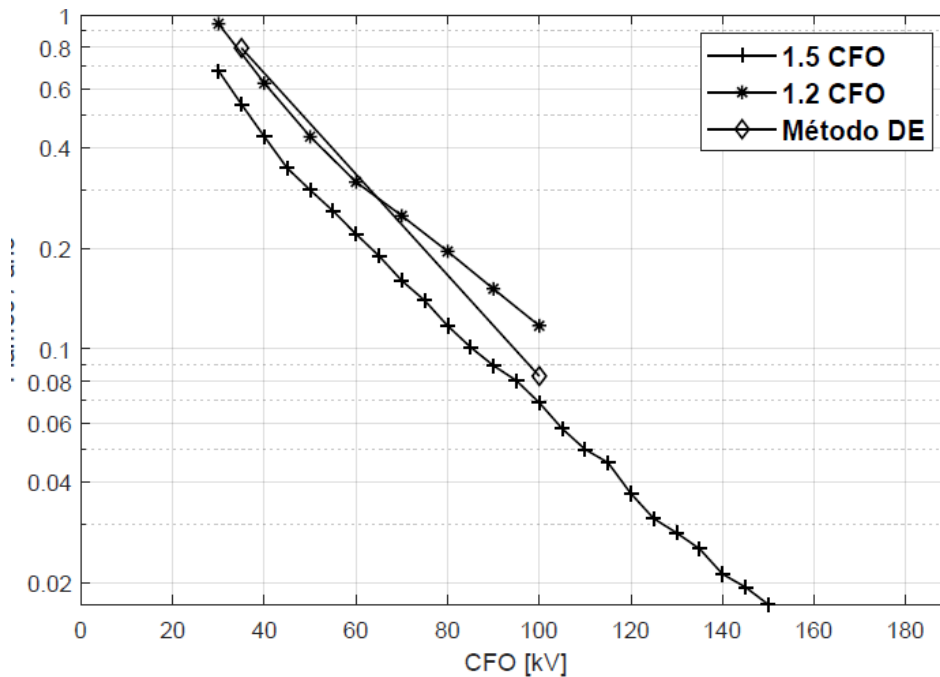
En esta sección se reproducen los resultados obtenidos en la sección IV de (De Conti, y otros, 2010), al simular la red aérea descrita en la sección 3.1 y obtener su tasa de fallas. Para esto

se hace una completa simulación de Monte Carlo de acuerdo a la metodología descrita en el numeral II-B con un número total de simulaciones de 25000. Se hace uso de los parámetros de la distribución de probabilidad adoptadas por CIGRÉ (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980) que se presentan en el cuadro I y se considera que el flameo se produce de acuerdo al criterio de 1.5-CFO y del método *DE*. Esta evaluación es útil para hacer un análisis cuantitativo del error incurrido al considerar el criterio simplificado de 1.5-CFO para estimar el desempeño de la red aérea ante rayos.

La Fig. 6 muestra la comparación de la tasa de fallas obtenida para la red con los dos criterios.

Figura 6.

Tasa de fallas de una red aérea de 1,2 km de longitud con una conductividad del suelo de 0,01 S/m.



Las curvas de la Fig 6. presentan un buen ajuste respecto a los resultados presentados en (De Conti, y otros, 2010), salvo que en el presente artículo se aplicó la fórmula (1) que produce un escalamiento de las curvas presentadas. Al igual que en (De Conti, y otros, 2010), las tasas de fallas estimadas con el criterio 1.5-CFO son más bajas que las estimadas con el método *DE*, con diferencias que van del 47.4 % para un CFO de 35 kV, al 20.1 % para un valor de CFO de 100 kV, Esto refuerza como en (De Conti, y otros, 2010) que el criterio 1.5-CFO subestima el índice de fallas de una red.

Dado que el método *DE* es mejor cuantitativamente al tener en cuenta el efecto de la forma de onda de la tensión inducida (De Conti, y otros, 2010), resulta conveniente buscar un criterio simplificado que conduzca a resultados similares al método *DE*. Como se ve en la Fig. 6, usar un umbral de 1.2-CFO lleva a resultados aceptables teniendo ligeras diferencias para valores altos de CFO. En (De Conti, y otros, 2010) para diferentes conductividades y valores de CFO el criterio estuvo en el rango entre 1.1 a 1.4 CFO.

6. Tasa de fallas de la red multiconductora en zona templada y tropical

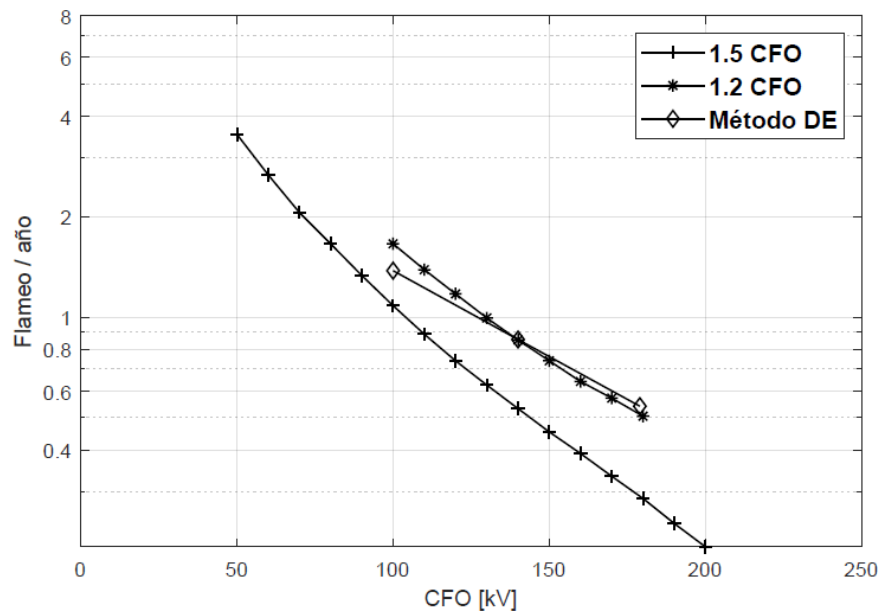
Ahora, se hará la comparación de la tasa de fallas de la red de distribución bajo estudio (sección 3.2), obtenida usando, como en la sección previa, el criterio de 1.5-CFO y el método *DE* para caracterizar el aislamiento y usando los parámetros del rayo escogidos tanto para zona templada como para zona tropical.

6.1 Tasa de fallas zona templada

La estimación en este caso parte de considerar los parámetros de la distribución de probabilidad adoptadas por CIGRÉ (Cigré Working Group 01 of SC 33, 1991) (Anderson & Eriksson, 1980). En la Fig. 7, se muestra la comparación de la tasa de fallas obtenida en la red para el criterio 1.5-CFO y el método *DE*. Adicionalmente, se ha incluido el criterio de 1.2-CFO como en la sección anterior.

Figura 7.

Tasa de fallas de red para zona templada con una conductividad del suelo de 0,001 S/m.



Como se presentó en (De Conti, y otros, 2010), las tasas de fallas estimadas haciendo uso del criterio 1.5-CFO son más bajas que las correspondientes al método *DE*. Las diferencias van del 27.33 % para valores de CFO cercanos a 100 kV y de 89.05 % para valores de CFO iguales a

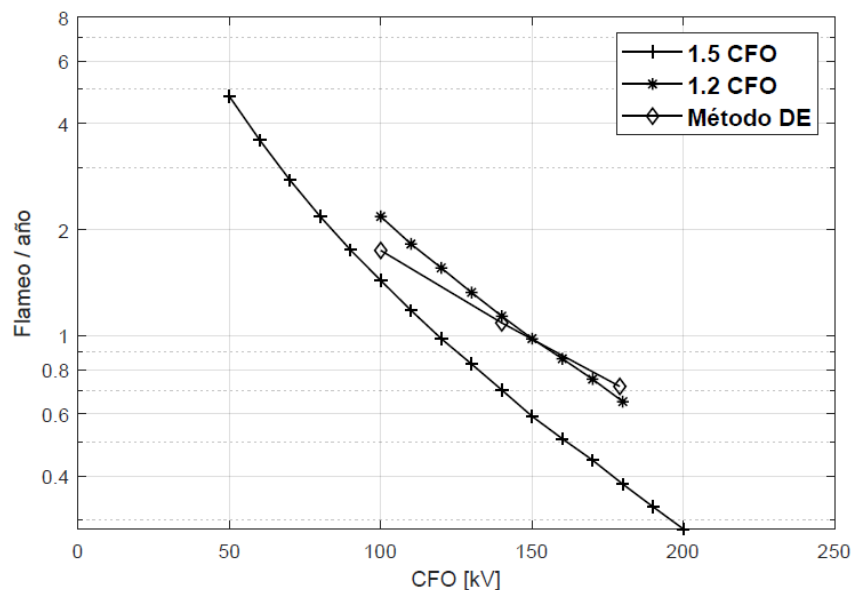
179 kV. Nuevamente, se evidencia que el criterio 1.5-CFO subestima el desempeño de la red de distribución. Se observa que utilizar un nivel de umbral más pequeño como 1.2-CFO, logra reproducir mucho mejor los resultados encontrados con el método *DE*, al menos para la media de los valores. Se destaca un aumento en la tasa de fallas para todos los valores de CFO considerados respecto a las curvas de la Figura 6. Esto se explica por la simulación de una red de distribución trifásica con alturas superiores a la red simplificada usada en (De Conti, y otros, 2010).

6.2 Tasa de fallas zona tropical

Haciendo uso de los parámetros del rayo consignados en el cuadro IV, se obtiene el índice de fallas de la red bajo estudio para zona tropical. En la Fig. 8 se muestran el resultado.

Figura 8.

Tasa de fallas de red de estudio 1.84 km de longitud asumiendo una conductividad del suelo de 0.001 S/m.



En este caso, se evidencia un leve incremento de la tasa de fallas como resultado del uso de los parámetros del rayo en zona tropical, con valores estadísticos de corrientes más altos que los de zona templada. El mismo comportamiento se ha evidenciado en trabajos previos (Soto, Pérez, & Del Río, 2017), (Silveira, Almeida, & Visacro, 2021). A pesar de esto, la tasa de fallas describe el mismo comportamiento de los casos anteriores: la tasa de fallas encontrada con el criterio 1.5-CFO es más baja que con el método *DE*, con diferencias que van desde el 21.67 % para valores cercanos a 100 kV de CFO, hasta el 90.18 % para un valor de CFO de 179 kV. Es decir, la subestimación hecha por el criterio *DE* del desempeño de la red también es clara en este caso.

Para este caso, se ha examinado el criterio simplificado que permita reproducir mejor el método de referencia (*DE*), siendo nuevamente 1.2-CFO el que conduce al mejor ajuste, con un error medio de 4.5 % y diferencias más marcadas para un CFO de 100 kV.

Se resalta que el criterio de 1.2-CFO es apropiado aun para zonas de estudio con parámetros del rayo distintos a los de zonas templadas como se había presentado en (De Conti, y otros, 2010) y también cuando se simulan redes menos simplificadas.

6. Conclusiones

En este artículo se implementó un modelo de flameo conocido en la literatura: el método *DE* que permite incluir las curvas reales del comportamiento de aisladores obtenidas de pruebas de laboratorio y tener en cuenta la forma de onda de la tensión inducida para determinar la ruptura

del aislamiento. Esta implementación se hizo tanto para redes simplificadas y multiconductoras ubicadas en zona templada y tropical.

Las tensiones inducidas por rayos obtenidas para la red multiconductora con parámetros de rayo de zona tropical evidencia un comportamiento similar al visto para una red simplificada en zona templada: se requiere de un valor inferior de umbral para producir flameo en comparación con el criterio tradicional de 1.5-CFO que tiende a subestimar esta estimación.

La tasa de fallas de la red permite considerar un gran número de eventos y reducir la incertidumbre de considerar eventos concretos. El análisis de la tasa de fallas de la red multiconductora obtenida tanto para zonas templadas como para zona tropical deja ver que persiste el hecho de que el criterio de 1.5 CFO subestima el número de flameos anuales esperados.

En este trabajo se logra incluir el efecto de los parámetros del rayo medidos en zona tropicales y zonas templadas en el cálculo de tasas de fallas de redes de distribución sobre suelos de conductividad finita. El efecto de considerar los parámetros de zona tropical es el de un leve incremento del número de flameos como resultado de valores pico de corriente más elevados. Se hizo una comparación entre el método *DE* y el criterio de 1.5-CFO, comprobando que el uso de un umbral bajo en el CFO (1.2-CFO) conduce a resultados similares al método *DE* en el cálculo de la tasa de fallas. Esto coincide con lo encontrado para zona templada.

Referencias Bibliográficas

- Agrawal, A., & Price, H. G. (1980). Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field, *IEEE Trans. Electromagn. Compat. EMC-22*, 119–129.
- Anderson, R. B., & Eriksson, A. J. (1980). Lightning parameters for engineering application. *Electra, no. 69*, 65–102.
- Ardila, B., Soto, E., & Velandia, K. (2021). Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. *Ingeniería. 26 (3)* , 419-435.
- 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 Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, 684–692.
- Chowdhuri, P. (1989). Estimation of flashover rates of overhead power distribution lines by lightning strokes to nearby ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 3, 1982–1989.
- Chowdhuri, P., & Gross, E. (1969). Voltages Induced on Overhead Multiconductor lines by Lightning Strokes. *Proceedings IEE*, vol. 116, 561-565.
- Cigré Working Group 01 of SC 33. (1991). *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines Cigré, ref. no. 63*.
- Cooray, V. (1992). Horizontal Field generated by Return Strokes. *Radio Science*, vol. 27, 529-537.

- Darveniza, M., & Vlastos, A. E. (1988). The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for nonstandard wave shapes—A theoretical basis. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 23, no. 3, 373–381.
- 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 Del.* 25 (4), 3078–3084.
- Diendorfer, G. (1990). Induced voltage on an overhead line due to nearby lightning. *IEEE Trans. Electromag. Compatib.*, vol. 32, 292-299.
- Eriksson, A. J., Stringfellow, M. F., & Meal, D. V. (1982). Lightning—Induced overvoltages on overhead distribution lines. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 4, 960–968.
- GAMMA . (2018). *Catálogo Aisladores de porcelana para redes de distribución y herrajes para montaje. .*
- IEEE Working Group. (1990). Calculating the lightning performance of distribution lines. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 3, 1408–1417.
- IEEE Working Group on Estimation Lightning Performance of Transmission Lines. (1985). A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 4, 919–932.
- IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines. (2004). Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. *IEEE Std. 1410*.
- NC - RA1 - 401. (s.f.). *Norma de construcción red aérea nivel de tensión 44 kV, 34.5 kV y 33 kV vertical. Configuración suspensión.*

- Nucci, C., Rachidi, F., Ianoz, M., & Mazzetti, C. (1993). Lightning Induced Voltages on Overhead Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, no. 1.
- Pérez, E., & Soto, E. (2010). *Software. Yaluk Draw*. Manizales: Universidad Nacional.
- Pérez, E., & Soto, E. (2013). Yaluk Draw: Software especializado para análisis del desempeño de líneas de distribución ante impacto de rayos. *Avances en Ingeniería Eléctrica. Av. en Ing. Eléctrica*, vol. 4, no. 1, 1–8.
- Rubinstein, M. (1996). An Approximate Formula for the Calculation of the Horizontal Electric Field from Lightning at Close, Intermediate, and Long Range, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, 12-16.
- Rusck, S. (1958). Induced Lightning Over-voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-voltage Protection of Low-voltage Networks. *Transactions of the Royal Institute of Technology*, vol. Stockholm, no. 120 .
- SC 33 Working Group 33.01. (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRÉ*.
- Silveira, F. H., Almeida, F. S., & Visacro, S. (2021). Influence of First Return Stroke Current Distributions of Tropical and Temperate Regions on the Assessment of Backflashover Occurrence of Transmission Lines. *35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, Colombo, Sri Lanka, 1-6.
- Silveira, F., & Visacro, S. (2020). Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions. *IEEE*, Vol. 62, No. 4.

- Soto, E., Pérez, E., & Del Río, D. (2017). Obtención del índice de fallas de líneas de distribución ante impactos indirectos de rayo en zona tropical. *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, 217-222.
- Soto, E., Perez, E., & Rio, D. D. (2022). 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*. 37 (5), 3590-3596. doi:10.1109/TPWRD.2021.3131542
- Uman, M. A., McLain, D. K., & Krider, E. P. (1975). The electromagnetic radiation from a finite antenna. *Am. J. Phys.*, vol. 43, no. 1, 33–38.
- Visacro, S., Mesquita, C. R., De Conti, A., & Silveira, F. H. (2012). Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station. *Atmospheric Research*, vol. 117, 55–63.
- Visacro, S., Soares J., A., Schroeder, M. A., Cherchiglia, L. C., & Souza, V. J. (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at morro do cachimbo station. *J. Geophys. Res.*, vol. 109, D01105.
- Wagner, C. F., & McCann, G. D. (1942). Induced voltages on transmission lines. *AIEE Trans.*, vol. 61, 916-930.