

Influencia de la separación entre resistencias de puesta a tierra en el desempeño ante rayos de  
redes de distribución ubicadas sobre terrenos no planos

Farid Arafath Cepeda González y Jaime Andrés Barrera Gómez

Trabajo 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 de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedico este logro académico a Dios, por guiarme con su sabiduría. A mi familia, especialmente mis padres, por su amor, sacrificios y apoyo incondicional. A mi pareja, por su compañía, aliento y soporte emocional. A mis amigos, por llenar mi vida de alegría y motivación. Por acompañarme en el transcurso de mi vida universitaria.

Farid Arafath Cepeda González

Dedico este logro a mi amada familia, a mi querida pareja y a mis apreciados padres. En particular, mi profundo agradecimiento se dirige a mi señora madre, Beatriz Gómez Tapias, cuyo amor incondicional y constante apoyo fueron pilares fundamentales en mi camino. Gracias a su inquebrantable cariño, incluso en sus últimos días a nuestro lado, he logrado llevar adelante esta carrera con éxito.

Jaime Andrés Barrera Gómez

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza para culminar este proceso. A mis padres Marco Tulio Cepeda y Mary Libia González por su apoyo y esfuerzos realizados. A mi hermano Erick Haceth Cepeda por su respaldo durante mi formación. A mi pareja por su compañía y apoyo en mi etapa universitaria. A mis amigos por sus aportes en mi crecimiento profesional. Un reconocimiento al Ing. Davis Chavarro y a mi director de proyecto, quienes con sus conocimientos y orientación permitieron finalizar satisfactoriamente este trabajo de grado. Gracias a todas las personas que de distintas maneras contribuyeron a alcanzar este logro académico.

Farid Arafath Cepeda González

Agradezco profundamente a Dios por haberme permitido alcanzar cada una de mis metas y por haber sido mi sostén en los momentos más difíciles. A mi padre, Jaime Barrera Pérez, le reconozco su constante apoyo y orientación no solo en mi proceso académico, sino también en mi vida en general. A mi madre, Beatriz Gómez Tapias, aunque ya no esté físicamente con nosotros, le estoy eternamente agradecido por los valores que me inculcó, el amor incondicional que me brindó y las innumerables alegrías que compartimos juntos. Agradezco también a mis tías por su constante atención y apoyo durante mi travesía universitaria. A toda mi familia, les debo un profundo reconocimiento por contribuir a forjar el carácter firme que me distingue hoy en día. Mi gratitud se extiende hacia mi pareja, quien ha sido un pilar fundamental en estos últimos años, impulsándome a convertirme en una mejor versión de mí mismo. Quiero reconocer también al Ing. Davis Chavarro y a mi director de trabajo de grado, les agradezco sinceramente por su experiencia y conocimiento en el tema. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

Jaime Andrés Barrera Gómez

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivo Específicos .....	14
2. Metodología .....	15
2.1 Cálculo de las tensiones inducidas.....	15
2.2 Cálculo de la tasa de fallas en redes de distribución.....	18
3. Configuración simulada .....	20
4. Resultados .....	23
4.1 Efectos de la resistencia de puesta a tierra en las tensiones inducidas por rayo.....	23
4.2 Tasa de Fallas.....	28
5. Conclusiones .....	32
6. Recomendaciones .....	33
Referencias.....	34
Apéndice .....	38

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Distribución de probabilidad log-normal para la corriente del rayo</i> .....	19
Tabla 2 <i>Máximas tensiones inducidas en puntos de medición en terreno plano</i> .....	24
Tabla 3 <i>Máximas tensiones inducidas en puntos de medición en terreno no plano</i> .....	25
Tabla 4 <i>Factor de reducción</i> .....	26
Tabla 5 <i>Análisis Estadístico de las tensiones inducidas para cada escenario</i> .....	29
Tabla 6 <i>Valores tomados de CFO para cada escenario</i> .....	31
Tabla 7 <i>Porcentajes de variación</i> .....	31

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Modelo circuito equivalente de Agrawal. Fuente: (Agrawal, Price, &amp; Gurbaxani, 1980)</i> .....	16
Figura 2 <i>Topografía simulada.</i> .....	20
Figura 3 <i>Especificaciones del terreno simulado (medidas dadas en metros).</i> .....	21
Figura 4 <i>Parámetros de configuración de la red.</i> .....	21
Figura 5 <i>Área de Impacto (medidas dadas en metros).</i> .....	22
Figura 6 <i>Eventos simulados (Vista planta dada en metros).</i> .....	23
Figura 7 <i>Tasa de fallas para las configuraciones simuladas.</i> .....	30
Figura 8 <i>Evento 1</i> .....	38
Figura 9 <i>Evento 2</i> .....	39
Figura 10 <i>Evento 3</i> .....	39
Figura 11 <i>Evento 4</i> .....	40
Figura 12 <i>Evento 5</i> .....	41

**Lista de Apéndices**

**pág.**

Apéndice A. Gráficas de las tensiones inducidas por rayos para cada uno de los eventos ..... 38

## Resumen

**Título:** Influencia de la separación entre resistencias de puesta a tierra en el desempeño ante rayos de redes de distribución ubicadas sobre terrenos no planos \*

**Autor:** Farid Arafath Cepeda González y Jaime Andrés Barrera Gómez \*\*

**Palabras Clave:** Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), Tasa de fallas, Terreno no plano, Resistencia de puesta a tierra (RPT), Cable de guarda, Tensiones inducidas, DPS.

**Descripción:** Este artículo analiza y compara las tensiones inducidas provocadas por impactos indirectos de rayo al incorporar resistencias de puesta a tierra separadas a una distancia de 500 m en una red de distribución aérea de 1 km de longitud. Se considera una topografía irregular en forma de "W" para proporcionar una perspectiva realista de una red aérea de distribución. Posteriormente, se calcula la tasa de fallas de dicha red utilizando la configuración de espaciamiento de 500 m entre resistencias de puesta a tierra. Para llevar a cabo estos cálculos, se emplea el método FDTD-3D para obtener las tensiones inducidas por rayos, en combinación con el método de Montecarlo según la norma IEEE-1410. La ubicación de los impactos de rayos sigue una distribución de probabilidad uniforme, mientras que la corriente pico ( $I_p$ ) y el tiempo de frente ( $t_f$ ) siguen una distribución de probabilidad log-normal adoptada por CIGRE. Los resultados se comparan para las mismas configuraciones en terreno plano y no plano. Se concluye que, la resistencia de puesta a tierra con un espaciamiento de 500 m ubicadas en una topografía irregular en forma de "W", proporcionan una reducción promedio del 51% en el valor máximo de tensión inducida obtenido. Asimismo, para la tasa de fallas en terrenos con topografía no plana es necesario manejar valores más altos de CFO en comparación con los utilizados en terrenos planos, esto es fundamental para lograr reducir a cero la tasa de flameos.

---

\* Trabajo de Grado

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

### Abstract

**Title:** Influence of the separation distance between grounding resistances on the performance against lightning strikes of distribution networks located on non-flat terrains.. \*

**Author(s):** Farid Arafath Cepeda González y Jaime Andrés Barrera \*\*

**Key Words:** Finite-Difference Time-Domain (FDTD), lightning-induced voltages, flashover rates, Non-flat ground, DPS, Grounding Resistance (RPT), Guard line

**Description:** This paper analyzes and compares the induced voltages caused by indirect lightning strikes by incorporating grounding resistors spaced 500 m apart in a 1 km long overhead distribution network. An irregular "W" shaped topography is considered to provide a realistic perspective of an overhead distribution network. Subsequently, the fault rate of such a network is calculated using the 500 m spacing configuration between grounding resistors. To carry out these calculations, the FDTD-3D method is used to obtain the lightning induced voltages in combination with the Monte Carlo method according to IEEE-1410. The location of lightning strikes follows a uniform probability distribution, while the peak current ( $I_p$ ) and front time ( $t_f$ ) follow a log-normal probability distribution adopted by CIGRE. The results are compared for the same configurations in flat and non-flat terrain. It is concluded that, grounding resistors with 500 m spacing located in an irregular "W" shaped topography, provide an average reduction of 51% in the maximum induced voltage value obtained. Likewise, for the failure rate in terrains with non-flat topography it is necessary to handle higher CFO values compared to those used in flat terrains, this is fundamental to achieve a zero flame rate reduction.

---

\* Degree Work

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

## Introducción

Las tensiones inducidas constituyen una de las principales causas de fallas en las redes de distribución eléctrica. Estas fallas se originan en su mayoría por aperturas en la red, ocasionadas por impactos indirectos. Estos impactos indirectos son más frecuentes que los impactos directos e inducen tensiones de elevado valor y corta duración, debido a sus corrientes e intensos campos electromagnéticos que se generan (Jurado Machado, 2013). Además, suelen presentarse como fallas de fase-fase o de fase a tierra, y pueden provocar el deterioro y daño de los equipos debido a los transitorios generados, los cuales exceden los niveles de aislamiento previstos para los dispositivos (Gomez & Morcos, Oct. 2002). En consecuencia, se producen interrupciones parciales o prolongadas en el suministro eléctrico, lo cual afecta negativamente los indicadores de calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica (Gomez & Morcos, Oct. 2002)- (Paolone M. , 2001). Estos cortes en el suministro pueden ocasionar diversas fallas en el sistema y afectar la confiabilidad de la red.

El valor máximo de tensión que se produce debido a las tensiones inducidas por impactos de rayos en una red de distribución se ve afectado por: la altura de la red, la conductividad del suelo, las ramificaciones de la red de distribución, puntos de interconexión del cable de guarda, la topografía no plana del terreno y los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) (Yokoyama, S., 1986).

La topografía del terreno desempeña un papel fundamental en el cálculo de los campos electromagnéticos generados por los impactos de rayos (Soto, Perez, & Herrera, Oct. 2014) (Hou, Azadifar, Rubinstein, Rachidi, & Zhang, Oct. 2020), así como de las tensiones inducidas producidas por estos (Perez, Soto, & Younes, 2014). Estudios previos (Chowdhuri & Gross, 1967)-

(Nucci, y otros, 1990) han sugerido que una topografía no plana plantea la necesidad de emplear una metodología diferente para calcular las tensiones inducidas y la tasa de fallas.

Para mitigar las tensiones inducidas provocadas por los impactos indirectos de rayos en terrenos planos. Yokoyama (Yokoyama, Jan. 1984) investigó la variación de la resistencia de puesta a tierra en una red multiconductora. Los resultados revelaron que, al implementar un valor de resistencia de puesta a tierra superior a cero, la tensión máxima inducida se incrementa de manera directa al aumento de dicha resistencia. En otro estudio, M.Paolone (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, Jan. 2004), examinó el efecto del espaciamiento donde se multiaterrizó la resistencia de puesta a tierra en el cable de guarda en relación con la máxima tensión inducida a lo largo de la red de distribución, arrojó que separaciones de 200 m entre resistencias de puesta a tierra proporcionan el mejor desempeño. En su estudio, A. Borghetti (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007), analizó la tasa de fallas para una red de distribución con una longitud de 2 km, variando la resistencia de puesta a tierra ubicada cada 200 m y manejando diferentes conductividades de suelo en las que se ubica la red. Los resultados demostraron que al implementar una resistencia de puesta a tierra elevada y una baja conductividad del terreno, se producía un incremento en la tasa de flameo, en comparación con la tasa de flameo obtenida en condiciones ideales, es decir, una resistencia de puesta a tierra igual a cero y una conductividad del suelo infinita.

En el estudio del comportamiento de las tensiones inducidas por rayos en terrenos no planos, Zhang (Zhang et al., Oct. 2019), evaluó las tensiones inducidas en dos configuraciones típicas de redes multiconductoras, considerando casos con y sin cables de guarda, para un terreno con pérdidas en forma cónica. Los resultados revelaron un aumento significativo de las tensiones inducidas en comparación con las obtenidas en un terreno plano. Además, se observó que a medida que incrementaba el ángulo de inclinación del terreno no plano, los valores máximos de las

tensiones inducidas por rayos aumentaban. Por otro lado, la investigación demostró que la implementación de cables de guarda es efectiva para reducir las tensiones inducidas en los extremos de la red donde se aterriza la resistencia de puesta a tierra.

En su investigación, Soto (Soto et al. & Perez, Nov. 2019) estudió las tensiones provocadas por impactos de rayos en redes de distribución ubicadas en una topografía irregular. Para realizar este estudio, el autor empleó la metodología diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) con el fin de calcular las tensiones inducidas por los impactos de rayo. Los resultados obtenidos en esta investigación revelaron que, en la mayoría de los escenarios evaluados, las tensiones inducidas por rayos en redes aéreas situadas en una topografía irregular resultaron ser mayores en comparación con aquellas registradas en terrenos planos.

En otro estudio (Ardila, Soto, & Del Rio, Oct.2019), se calculó la tasa de fallas de una red aérea de distribución ubicada sobre un terreno irregular, utilizando el método FDTD-3D en conjunto con el procedimiento de Montecarlo, siguiendo los lineamientos del estándar IEEE-1410. Los resultados revelaron que, para ciertos valores de CFO, la tasa de fallas en terrenos no planos puede ser de 100 a 200 veces superior a la tasa de fallas encontrada en terrenos planos.

Hasta la fecha, no se han llevado a cabo investigaciones que consideren el efecto de la separación entre resistencias de puesta a tierra, para el cálculo de las tensiones inducidas y la tasa de fallas en terrenos no planos. Por esto, el propósito de esta investigación es calcular las tensiones inducidas por rayos en una red aérea de distribución sobre un terreno no plano en forma de “W” implementando la separación de las resistencias de puesta a tierra (RPT) ubicadas al inicio, mitad y final del cable de guarda, posteriormente se calcula la tasa de fallas en este terreno y se finaliza comparándolo con la tasa de fallas obtenida en un terreno plano.

Este documento está estructurado de la siguiente manera: En el Capítulo 2 apartado 2.1 se presenta la metodología para calcular las tensiones inducidas por rayos en topografías no planas utilizando el método FDTD-3D. Además, se describe cómo se integran la red de distribución, el canal de la descarga y las resistencias de puesta a tierra (RPT) en el método FDTD-3D. En el apartado 2.2 se describe la metodología para determinar la tasa de fallas en terrenos no planos. En el Capítulo 3 se dedica a la descripción del caso simulado, incluyendo una descripción del terreno, la red de distribución y las configuraciones de las RPT. En el Capítulo 4 se presentan los resultados de las máximas tensiones inducidas por rayos al utilizar RPT, y la tasa de fallas, tomando cada 100 m los puntos de medición a lo largo de la red. En el Capítulo 5, se exponen las conclusiones del estudio y finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las recomendaciones para trabajos futuros.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Desarrollar un estudio sobre la influencia de la separación entre resistencias de puesta a tierra en el desempeño ante rayos de redes de distribución ubicadas en terrenos no planos.

### **1.2 Objetivo Específicos**

Simular las tensiones inducidas por rayos en redes de distribución ubicadas sobre terrenos no planos cuando se varía la separación entre resistencias de puesta a tierra de estas.

Obtener las tasas de fallas de redes de distribución ubicadas sobre terrenos irregulares cuando se varía la separación entre resistencias de puesta a tierra.

Concluir sobre el efecto de la separación entre resistencias de puesta a tierra y la tasa de fallas en las tensiones inducidas por rayos obtenidas en redes de distribución sobre terrenos irregulares

## 2. Metodología

### 2.1 Cálculo de las tensiones inducidas

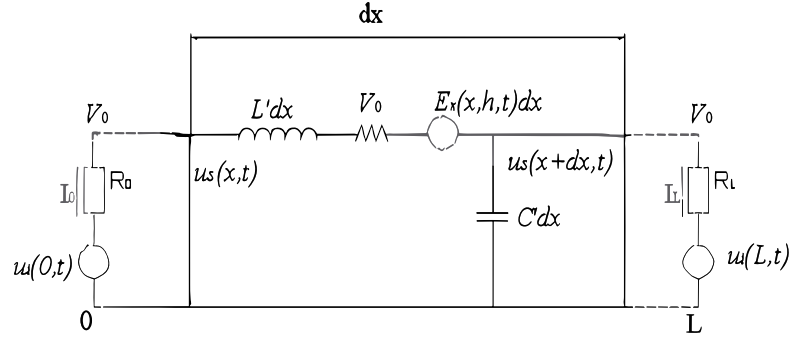
En esta investigación se empleará el modelo MTLE (Línea de transmisión exponencial modificada) (Perez et al, Nov.2006) (Rachidi & Nucci, 1985), una derivación del modelo MTL (Línea de transmisión modificada) (Nucci et al, Rachidi, Ianoz, & .Mazzetti, Feb.1993). El modelo MTLE introduce una modificación específica en la magnitud de la corriente, la cual disminuye conforme ésta se propaga a través del canal del rayo. Lo anterior permite considerar el efecto de la distribución vertical de carga generada por la corona del líder (Perez et al, Nov.2006) (Rachidi & Nucci, 1985).

En el caso de una red de distribución ubicada en terreno plano, el cálculo del campo electromagnético generado por la corriente a lo largo de la red de distribución se realiza mediante la aplicación de las ecuaciones de Master y Uman (Master & Uman, 1983) (Uman, Mclain, & Krider, 1975). La tensión inducida resultante se determina a partir del campo electromagnético previamente calculado, utilizando el modelo de acoplamiento de Agrawal para la obtención de tensiones inducidas (Figura 1) (Agrawal, Price, & Gurbaxani, 1980).

En esta sección que aborda el cálculo de las tensiones inducidas para terrenos planos, se emplea el software Yaluk Draw (Soto & Perez, 2010). Este software permite obtener la tensión inducida al considerar el acoplamiento entre el campo electromagnético de la descarga y la red aérea de distribución por medio del modelo de acople de Agrawal (Agrawal, Price, & Gurbaxani, 1980).

**Figura 1**

*Modelo circuito equivalente de Agrawal. Fuente: (Agrawal, Price, & Gurbaxani, 1980)*



Para determinar los campos electromagnéticos se usa método de diferencias finitas en el dominio del tiempo en coordenadas cartesianas en 3D (FDTD-3D), según se describe en (Yee, 1966) (Elsherbeni & Demir, 2016). Este método actualiza los campos eléctricos y magnéticos en cada subdominio cúbico del espacio utilizando las ecuaciones ( 1) y ( 2).

$$\begin{aligned}
 E_Z^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_z - \Delta t\sigma_z}{2\varepsilon_z + \Delta t\sigma_z} E_Z^n(i, j, k) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z + \Delta t\sigma_z)\Delta x} (H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 &\quad - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - 1, j, k)) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z + \Delta t\sigma_z)\Delta x} (H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 &\quad - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i - 1, j, k)) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z + \Delta t\sigma_z)\Delta x\Delta y} (I_s^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_y - \Delta t\sigma_y}{2\mu_y + \Delta t\sigma_y} H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \frac{2\Delta t}{(2\mu_y + \Delta t\sigma_y)\Delta y} (E_Z^n(i + 1, j, k) \\
 &\quad - E_Z^n(i, j, k)) - \frac{2\Delta t}{(2\mu_y + \Delta t\sigma_y)\Delta z} (E_x^n(i, j, k + 1) - E_x^n(i, j, k))
 \end{aligned} \tag{2}$$

Donde:

$H_x$  y  $H_y \rightarrow$  Campos magneticos.

$E_x$  y  $E_y \rightarrow$  Campos electricos.

$\sigma$  y  $\varepsilon \rightarrow$  Conductividad y permitividad .

$\Delta t \rightarrow$  Paso de tiempo.

$i, j, k \rightarrow$  Variables que indican las posiciones discretas en el espacio.

$n \rightarrow$  Posicion discreta en el tiempo.

Los campos electromagnéticos (horizontal  $E_x$  y vertical  $E_z$ ) calculados con el método FDTD-3D se introdujeron en el método de acople de Agrawal (Agrawal, Price, & Gurbaxani, 1980), para calcular la tensión inducida a lo largo de la línea. Dado que las líneas simuladas en este artículo son completamente horizontales, la inclusión de los campos en el método de acople es simple y no produce errores por discretización de la línea (Noda, Yonezawa, Yokoyama, & Takahashi, 2004). De otro lado, para incluir las resistencias de puesta a tierra a lo largo de la línea se recurrió a la metodología de discontinuidades transversales planteada por Paolone et al (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, Jan. 2004). La tensión inducida en la discontinuidad  $v_i$  se puede calcular por medio de la corriente inyectada a tierra en ese nodo ( $i_{g,i}$ ), la resistencia de puesta a tierra  $\Gamma_{ij}$  y el campo eléctrico vertical  $E_z$  (ver ecuación ( 3 ) )

$$[V_i^g] = [\Gamma_{ij}][i_{g,i}] + \left[ \int_0^{h_i} E_z^g(x, z, t) dz \right] \quad (3)$$

Para limitar el espacio computacional, todas las superficies cúbicas se trataron como límites absorbentes de segundo orden de Liao (Liao, Wong, Yang, & Yuan, 1984). En cuanto a esta topografía no plana, se modeló mediante escaleras por debajo de las cuales la conductividad toma un valor alto para representar el terreno sin pérdidas. El canal de la descarga de retorno está representado por el modelo MTLE (Torres & Perez, 2010) con una constante de atenuación de  $\lambda = 2000$ . La corriente en la base del canal se representa por una onda tipo Heidler (Heidler, Cvetic, & Stanic, Apr. 1999).

## 2.2 Cálculo de la tasa de fallas en redes de distribución

La determinación de la tasa de fallas en una red de distribución se obtiene según el estándar IEEE 1410 (Power & Society, 2010). Este proceso involucra la combinación de dos enfoques clave: la simulación de Monte Carlo (MC) y el uso de un software especializado diseñado para calcular la tensión inducida por descargas eléctricas a lo largo de la red. En nuestro caso, el software empleado fue desarrollado en MATLAB y se basa en el método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo en coordenadas cartesianas en 3D (FDTD-3D), que permite calcular las tensiones inducidas en redes aéreas situadas sobre terrenos no planos, siguiendo la metodología descrita en la Sección 2.1. Los pasos para calcular la tasa de fallas de una red ubicada en un terreno no plano son los siguientes:

**Paso 1)** Se genera de manera aleatoria un gran número de impactos ( $n_{tot}$ ) alrededor de la red. En el caso de terrenos no planos, cada impacto se caracteriza por cinco parámetros: la corriente pico ( $I_p$ ), el tiempo de frente ( $t_f$ ), las coordenadas  $X_o, Y_o$ , y la altura  $Z_o$  del impacto. Los valores de  $I_p$  y  $t_f$  siguen las distribuciones de probabilidad log-normal establecidas por CIGRÉ (CigréWorking Group 01 of SC 33, Oct.1991), (ver Tabla 1 ). Las

coordenadas  $X_o$  y  $Y_o$  siguen una distribución de probabilidad uniforme, y con el fin de que las tensiones inducidas solo estén influenciadas por la topografía del terreno, la altura  $Z_o$  sigue una distribución de probabilidad uniforme.

**Tabla 1**

*Distribución de probabilidad log-normal para la corriente del rayo*

Parámetro	Mediana		Desviación estándar	
	$I_p \leq 20$ kA	$I_p \geq 20$ kA	$I_p \leq 20$ kA	$I_p \geq 20$ kA
$I_p$ (kA)	61	33,3	1,33	0,605
$t_f$ ( $\mu$ s)	3,83		0,553	

**Paso 2)** Para cada evento simulado, se comprueba si ocurre un impacto directo utilizando el método electro-geométrico (IEEE Working Group, July.1990). En caso de cumplirse esta condición, el evento será considerado como un impacto directo y no será simulado.

**Paso 3)** Finalmente, la tensión inducida para cada evento es calculada utilizando el software desarrollado en MATLAB. Para cada evento simulado, se obtiene la tensión máxima con puntos de medición cada 100 m a lo largo de la red de distribución. La tasa de flameos anuales ( $F_p$ ), se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$F_p = \frac{n}{n_{tot}} * N_g * A \quad (4)$$

Donde:

$n_{tot} \rightarrow$  Número total de eventos.

$N_g \rightarrow$  Densidad de descargas a tierra.

$A \rightarrow$  Área de impacto en  $km^2$  ( $X_{max} \times Y_{max}$ ).

$n \rightarrow$  El número de eventos que superan un determinado valor de CFO.

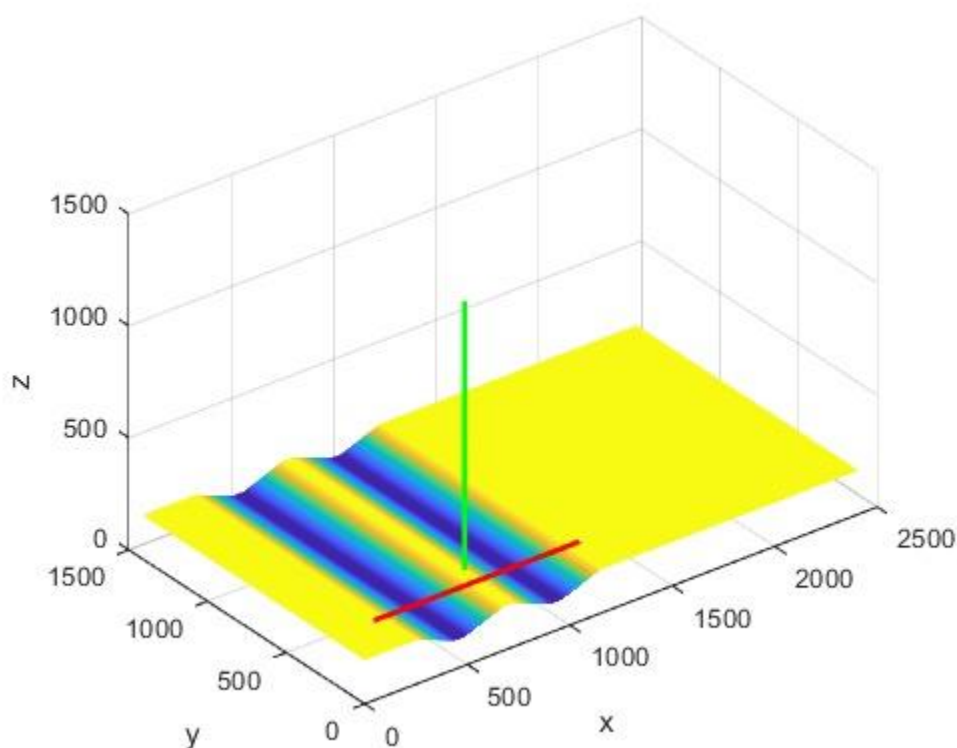
### 3. Configuración simulada

El terreno no plano simulado se muestra en la Figura 2, la cual presenta las siguientes medidas: un ancho de 2400 m, un largo de 1000 m y una altura máxima de 200 m para representar una montaña típica de la topografía colombiana.

La topografía seleccionada presenta una forma de "W", conformada por dos valles de 50 m de ancho cada uno. Entre dichos valles se encuentra una elevación del terreno con una meseta de 50 m de extensión en su cima. Para la simulación se consideró un ángulo de inclinación de  $20^\circ$  (Figura 3), asumiendo una conductividad infinita del terreno y una permitividad relativa de 10.

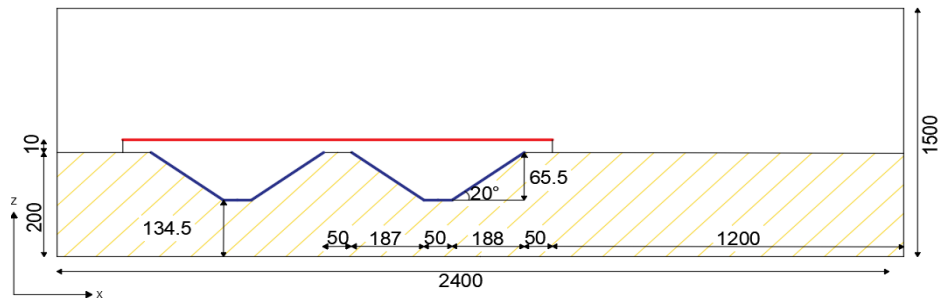
#### Figura 2

*Topografía simulada.*



**Figura 3**

*Especificaciones del terreno simulado (medidas dadas en metros).*

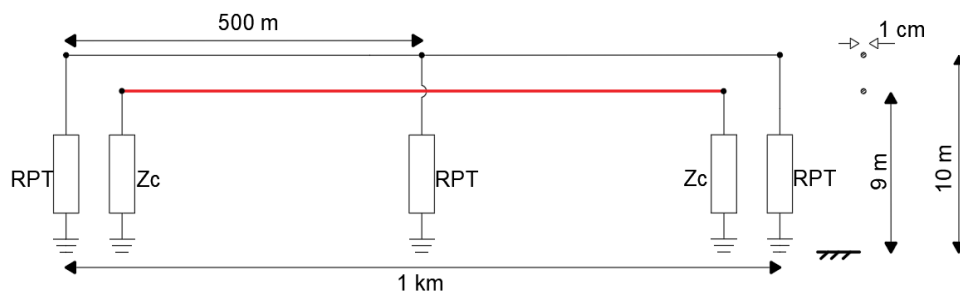


La red de distribución seleccionada consta de un único conductor y un cable de guarda, ambos con una longitud de 1 km y un radio de 5 mm, correspondiente a un conductor tipo 2/0 ACSR. La altura de instalación del conductor es de 9 m sobre el nivel del suelo, mientras que para el cable de guarda es de 10 m, la cual opera a un nivel de tensión de 13,2 kV.

La red de distribución posee una resistencia en DC de 0,522 Ω/km, una impedancia característica ( $Z_c$ ) de 497.3 Ω y una resistencia de puesta a tierra (RPT) de 10 Ω (Figura 4). Las cuales se conectan a la red para proporcionar protección contra sobretensiones y descargas atmosféricas, minimizando así el riesgo de daños en la red y los equipos conectados.

**Figura 4**

*Parámetros de configuración de la red.*



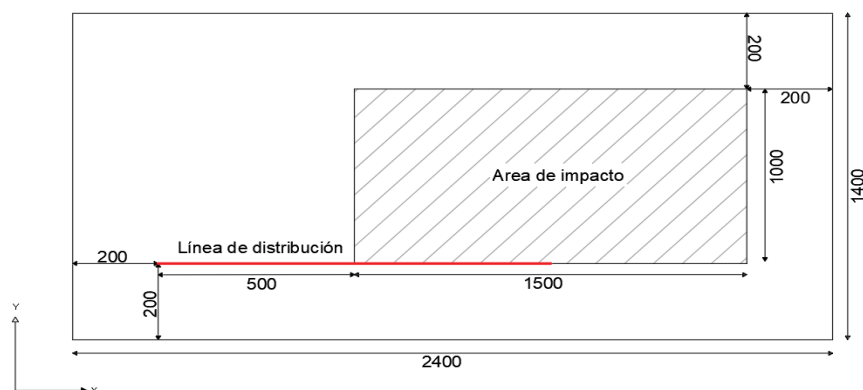
Para estimar el efecto de conexión a tierra de la RPT en la red de distribución situada en el terreno irregular descrito en la Figura 3, se simularon tres casos de estudio diferentes. En el primer

caso, se simuló la red sin la presencia de cable de guarda sobre el terreno irregular. En el segundo caso, se incorporó el cable de guarda a la red con *RPT* ubicadas al inicio y final. En el tercer caso, las *RPT* se asignaron a intervalos de 500 m a lo largo de la red. La corriente en la base del canal de la descarga se modeló mediante la función de Heidler. La velocidad de la descarga de retorno es de 120 m/ $\mu$ s, y la variación a lo largo del canal se modeló usando el modelo MTLE con una constante de atenuación  $\lambda = 2000$ . Las coordenadas de los impactos siguen distribuciones de probabilidad uniforme.

El área de impacto simulada para el cálculo de la tasa de fallas se definió considerando los impactos a una distancia de 1.5 km desde el centro de la red en la dirección X, y a 1 km desde el extremo de la red en la dirección Y, tal como se ilustra en la Figura 5. La delimitación del área se realizó siguiendo los lineamientos establecidos por Borghetti en trabajos previos para conductividad infinita (Borghetti, Nucci, & Paolone, 2007). Con el objetivo de prevenir perturbaciones en las tensiones calculadas, se estableció una distancia de 200 m entre la red y el área de impacto en las fronteras Liao. Consecuentemente, el volumen de simulación fue de  $2400 \times 1400 \times 1500 \text{ m}^3$ . El tiempo máximo de simulación se fijó en 11  $\mu$ s.

### Figura 5

*Área de Impacto (medidas dadas en metros).*



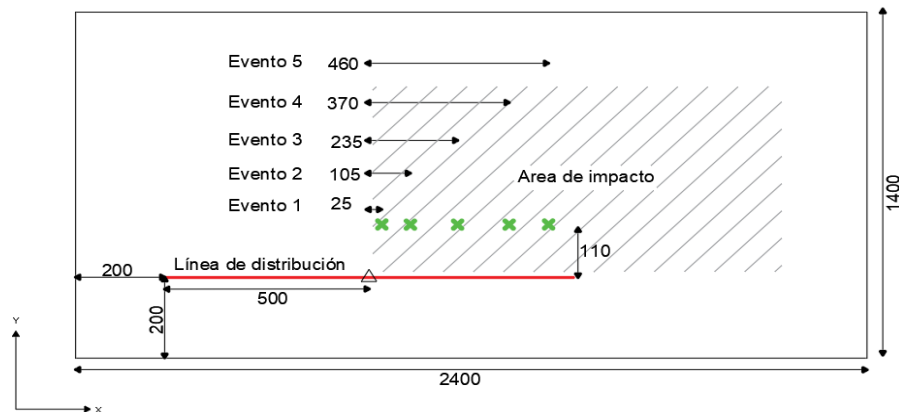
## 4. Resultados

### 4.1 Efectos de la resistencia de puesta a tierra en las tensiones inducidas por rayo.

Se evaluó el efecto de la implementación de resistencias de puesta a tierra (RPT) en el cable de guarda en las tensiones inducidas a partir de cinco eventos simulados, como se muestra en la Figura 6. La selección de estos cinco eventos se realizó con el fin de contrastar los valores de tensiones inducidas que se dan en diferentes ubicaciones cerca de la red ubicada en un terreno no plano en forma de "W".

#### Figura 6

*Eventos simulados (Vista planta dada en metros).*



Para la caracterización de los cinco eventos de impacto de rayo analizados en este estudio, se emplearon dos funciones de Heidler con el fin de modelar los parámetros de las respectivas corrientes registradas. La corriente de rayo presenta una amplitud máxima de  $12 \text{ kA}$  y la derivada de la corriente es de  $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$ , los parámetros de Heidler son:  $Ih_1 = 10.7 \text{ kA}$ ,  $\tau_{11} = 0.25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{12} = 2.5 \mu\text{s}$ ,  $n_1 = 2$ ,  $Ih_2 = 6.5 \text{ kA}$ ,  $\tau_{21} = 2.1 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{22} = 230 \mu\text{s}$ ,  $n_2 = 2$  y un  $\Delta t = 10 \mu\text{s}$ . Es importante destacar que, para ambas funciones, las coordenadas espaciales de los puntos de

impacto de rayo se produjeron a 100 m al frente de la red y a distancias que van desde 25 m hasta 460 m del centro de la red, como se muestra en la Figura 6.

Las tensiones inducidas máximas se presentan en la Tabla 2 para terrenos planos y en la Tabla 3 para terrenos no planos. Ambas tablas registran los 5 eventos simulados (Figura 6). Para cada evento, se registraron tres puntos de medición: "Inicio", "Mitad" y "Fin". Los datos se recopilaron para tres configuraciones distintas: Sin RPT,  $\Delta_{RPT} = 1000$  m (kV) y  $\Delta_{RPT} = 500$  m (kV).

**Tabla 2**

*Máximas tensiones inducidas en puntos de medición en terreno plano*

Eventos	Puntos de medición	Sin RPT	$\Delta_{RPT}=1000$ m	$\Delta_{RPT}= 500$ m
#		(kV)	(kV)	(kV)
1	Inicio	25.8	16.9	16.6
	Mitad	34	34	21.1
	Fin	25.7	16.8	16.5
2	Inicio	25.9	16.9	16.6
	Mitad	32.3	32.3	20.1
	Fin	25.6	16.7	16.6
3	Inicio	25.9	17	16.7
	Mitad	30.1	30.1	18.7
	Fin	25	16.4	16.3
4	Inicio	25	16.4	16.1
	Mitad	28.1	28.1	17.5
	Fin	23.3	15.2	15.2
5	Inicio	16.7	11	10.9
	Mitad	19.8	19	12.3
	Fin	20	13	13

**Tabla 3***Máximas tensiones inducidas en puntos de medición en terreno no plano*

Eventos	Puntos de medición	Sin RPT	$\Delta_{RPT}=1000m$	$\Delta_{RPT}= 500 m$
#		(kV)	(kV)	(kV)
1	Inicio	104.7	71.8	38
	Mitad	155.1	155.1	70.3
	Fin	90.3	62	28.3
2	Inicio	134.1	92.1	56.8
	Mitad	161.7	161.7	73.2
	Fin	71.8	49.2	44
3	Inicio	141.4	97.3	63.4
	Mitad	154.7	154.7	70.1
	Fin	138.8	95.6	95.6
4	Inicio	65.4	44.4	27.8
	Mitad	76.6	76.5	34.3
	Fin	126.8	87.2	87.2
5	Inicio	26.6	20.3	10.9
	Mitad	42.8	26.7	20.6
	Fin	81.2	55.8	55.8

A partir de los datos presentados en la Tabla 2 y Tabla 3, se calcularon los factores de reducción para las distintas topografías analizadas en este estudio. Estos factores se determinaron para dos escenarios diferentes: 1) " $\Delta_{RPT}= 1000 m$  con respecto a Sin RPT" y 2) " $\Delta_{RPT}= 500 m$  con respecto a Sin RPT".

**Tabla 4***Factor de reducción*

Eventos #	Puntos de medición	Factor de reducción entre $\Delta_{RPT}=$ 1000 m y Sin RPT		Factor de reducción entre $\Delta_{RPT}= 500$ m y Sin RPT	
		Terreno Plano	Terreno no plano	Terreno Plano	Terreno no plano
1	Inicio	34%	31%	36%	64%
	Mitad	0%	0%	38%	55%
	Fin	35%	31%	36%	69%
2	Inicio	35%	31%	36%	58%
	Mitad	0%	0%	38%	55%
	Fin	35%	31%	35%	39%
3	Inicio	34%	31%	36%	55%
	Mitad	0%	0%	38%	55%
	Fin	34%	31%	35%	31%
4	Inicio	34%	32%	36%	57%
	Mitad	0%	0%	38%	55%
	Fin	35%	31%	35%	31%
5	Inicio	34%	24%	35%	59%
	Mitad	4%	38%	38%	52%
	Fin	35%	31%	35%	31%

El análisis de los factores de reducción presentó comportamientos diferenciados entre terrenos planos y no planos, según se muestra en la Tabla 4. Para el escenario entre " $\Delta_{RPT}= 1000\text{ m}$  y Sin RPT" en terreno plano, se registraron valores en el punto de medida medio del 0% en cuatro eventos, esto se debe a que en el punto medio de la red no se ubicó una resistencia de

puesta a tierra lo cual no genero variaciones y un 4% en un evento específico, Sin embargo, se registraron variaciones importantes entre 34% y 35% en los puntos de medida inicio y final.

En contraste, para el terreno no plano entre " $\Delta_{RPT}=1000$  m y Sin RPT", los puntos de medida exhibieron mayor uniformidad alrededor del 31%, exceptuando un valor atípico del 24% en el quinto evento y una mayor dispersión en el punto de medida medio, con máximos de 38%.

Para el escenario entre " $\Delta_{RPT}= 500$  m y Sin RPT" en terreno plano, los factores de decrecimiento mostraron un comportamiento similar en los tres puntos de medición analizados, manteniéndose constantes en un promedio de decrecimiento del 35% para los puntos de medida inicial y final. No obstante, en el punto de medida medio se observó un factor de aumento uniforme del 38% en todos los eventos registrados. En contraste, para el terreno no plano en el escenario entre " $\Delta_{RPT}= 500$  m y Sin RPT", se obtuvo un factor promedio de decrecimiento del 57% en los puntos de medida inicial y medio para los eventos registrados. Para el punto de medida final, se presentó un factor de decrecimiento similar al obtenido en el escenario " $\Delta_{RPT}= 1000$  m y Sin RPT" para terreno no plano, a partir del evento dos, con la excepción del evento uno, en el cual se logró un decrecimiento del 69% para el escenario de " $\Delta_{RPT}= 500$  m y Sin RPT".

Los resultados obtenidos en la Tabla 4, en el punto medio de la red, revelaron que, para una topografía no plana, el factor de reducción superó el 50% cuando se comparó el escenario " $\Delta_{RPT}= 500$  m con respecto a Sin RPT". Por otra parte, para el escenario " $\Delta_{RPT}= 1000$  m con respecto a Sin RPT", el factor de reducción fue aproximadamente igual o cercano al 30%.

Se puede decir que, para una separación entre resistencias de puesta a tierra en el cable de guarda de 500 m, la reducción en terreno plano es en promedio del 36%, mientras que para terreno

no plano es de 51%. Esto lleva a concluir de manera preliminar que el efecto de reducción de la inclusión de la resistencia de puesta a tierra es más significativo en terreno no plano.

En general, estos hallazgos preliminares sugieren que la incorporación de resistencias de puesta a tierra podría ser una medida efectiva para mitigar las tensiones inducidas en configuraciones de terreno no plano. Sin embargo, se recomienda ampliar el número de eventos para concluir la eficacia en el desempeño de la resistencia de puesta a tierra (RPT) en terreno no plano.

#### **4.2 Tasa de Fallas**

Siguiendo la metodología del estándar IEEE 1410 (Power & Society, 2010) para terrenos planos, y el enfoque descrito en la Sección II-B, se calculó la tasa de fallas en la red de distribución para tres escenarios:

- A. Terreno plano sin resistencia de puesta a tierra (RPT).
- B. Terreno plano con resistencia de puesta a tierra cada 500 m ( $\Delta_{RPT} = 500 \text{ m}$ )
- C. Terreno no plano en forma de "W" con resistencia de puesta a tierra cada 500 m ( $\Delta_{RPT} = 500 \text{ m}$ ).

Para cada uno de estos escenarios, se presenta un resumen de las estadísticas de las tensiones máximas inducidas en la red, considerando puntos de medición cada 100 m y excluyendo los impactos directos del total de simulaciones realizadas para el cálculo de la tasa de fallas (ver Tabla 5).

**Tabla 5***Análisis Estadístico de las tensiones inducidas para cada escenario*

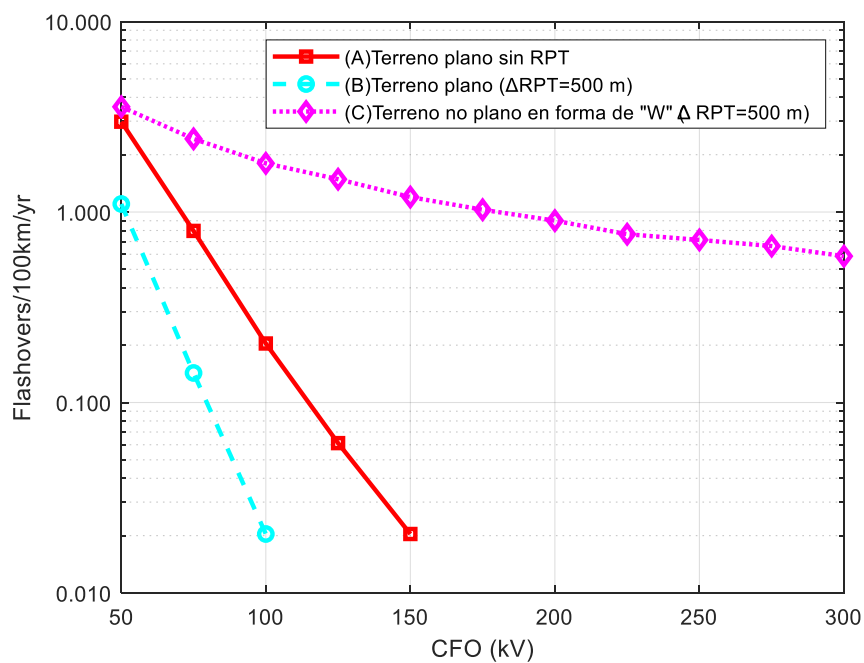
Parámetros	Terreno plano sin <i>RPT</i>	Terreno plano con $\Delta_{RPT} = 500$ m	Terreno no plano en forma de "W" con $\Delta_{RPT} = 500$ m
Simulaciones	10000	10000	883
#Impactos indirectos	9799	9799	704
Mediana [kV]	7.7	5.2	89.5
Media [kV]	12.9	8.8	217.6
Des. Estándar[kV]	16.6	11.8	478.3
Val. Mínimo [kV]	0	0.1	1.5
Val. Máximo[kV]	255	165.4	4977

En la Tabla 5 se muestra que para el terreno no plano en forma de "W" con  $\Delta_{RPT} = 500$  m, las tensiones máximas inducidas fueron significativamente más altas en comparación con los terrenos planos. Además, el valor máximo de tensión inducida fue de 4977 kV para un terreno no plano en forma de "W", superando ampliamente los 255 kV y 165.4 kV registrados en terrenos planos. Estos resultados sugieren un impacto sustancial de la topografía del terreno en las tensiones máximas inducidas en la red de distribución.

Utilizando los valores de las tensiones máximas inducidas obtenidas a partir de los impactos indirectos, registrados cada 100 metros, se calculó la tasa de flameos de anuales ( $F_p$ ) empleando la Ecuación ( 3) para los tres escenarios mencionados anteriormente: A) Sin RPT en terreno plano, B) terreno plano con  $\Delta_{RPT} = 500$  m, y C) terreno no plano con forma de "W" y  $\Delta_{RPT} = 500$  m. Los resultados de este cálculo se presentan gráficamente en la Figura 7.

**Figura 7**

*Tasa de fallas para las configuraciones simuladas.*



La Tabla 6 presenta los valores numéricos de la Figura 7 para valores de CFO que van desde 50 hasta 100  $kV$ , en incrementos de 10, para los tres tipos de configuraciones de terreno ilustradas en la Figura 7.

**Tabla 6***Valores tomados de CFO para cada escenario*

CFO [KV]	Terreno plano Sin RPT	Terreno plano con $\Delta_{RPT}=$	Terreno no plano en forma de
		500m	"W" con $\Delta_{RPT}= 500m$
50	3	1.1	3.6
60	1.7	0.5	2.9
70	1.1	0.3	2.6
80	0.6	0.1	2.3
90	0.2	0.1	2
100	0.2	0.02	1.8

Los porcentajes de variación de la curva de “C” en el terreno no plano con forma de “W” y  $\Delta_{RPT}= 500$  m, en relación con las curvas “A” sin resistencia de puesta a tierra y “B”  $\Delta_{RPT}= 500$  m en terreno plano, se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7***Porcentajes de variación*

CFO [KV]	Variación de la curva entre $\Delta_{RPT}= 500$ m en	Variación de la curva entre $\Delta_{RPT}= 500$ m en
	terreno no plano en forma de “W” entre Sin	terreno no plano en forma de “W” entre $\Delta_{RPT}=$
	RPT en terreno plano	500 m en terreno plano
50	20%	227%
60	71%	480%
70	136%	767%
80	283%	2200%
90	900%	1900%
100	800%	8900%

Los resultados obtenidos de la curva “C” (Figura 7) para un terreno no plano en forma de “W” y  $\Delta_{RPT} = 500$  m muestran un aumento significativo en la tasa de fallas del 800% para un CFO de 100 kV en comparación con la curva “A” para un terreno plano sin resistencia de puesta a tierra (RPT). Además, se observa un incremento del 8900% respecto a la curva “B” para un terreno plano con  $\Delta_{RPT} = 500$  m. Si bien para valores menores de CFO, los porcentajes son menores, estos se encuentran todos por encima del 200 % lo cual es muy alto. Hay que tener en cuenta que para valores de CFO por encima de 100 kV no se realizó comparación teniendo en cuenta que en terreno plano la tasa de fallas es nula. Esto lleva a concluir que en terrenos no planos se requiere un valor de CFO mucho alto que en terreno plano para llevar a cero la tasa de flameos a pesar del efecto reductor que produce el multiterrizamiento del cable de guarda. Estos hallazgos corroboran lo expuesto en la literatura (Perez, Soto, & Younes, 2014) (Zhang et al., Oct. 2019) (Soto et al. & Perez, Nov. 2019), donde se establece que las tensiones inducidas por impactos de rayo en terrenos no planos son superiores a las obtenidas en terrenos planos, lo cual conlleva a un aumento en la tasa de fallas (Ardila, Soto, & Del Rio, Oct.2019).

## 5. Conclusiones

En el presente estudio, se analizó la influencia de la separación entre resistencias de puesta a tierra (RPT) en una red de distribución eléctrica situada sobre un terreno no plano con forma de "W". El análisis se dividió en dos partes.

La primera parte se centró en la obtención de las tensiones máximas inducidas en tres puntos clave de la red: inicio, mitad y fin, a partir de cinco impactos indirectos de rayo definidos. Los resultados mostraron que al ubicar las RPT cada 500 metros, el porcentaje promedio de

reducción de las tensiones máximas fue del 51% en el terreno no plano en forma de "W", en contraste con una reducción del 36% en un terreno plano.

En la segunda parte, se determinó la tasa de fallas de una red de distribución de 1 km de longitud que atravesaba el terreno no plano en forma de "W". Para ello, se combinó el método FDTD-3D y el método de Montecarlo. Al calcular las tensiones inducidas en la tasa de fallas, se encontró que el valor de la mediana de las tensiones máximas inducidas para un terreno no plano en forma de "W" con  $\Delta_{RPT} = 500$  m, presentó un incremento de 16 veces en comparación con las obtenidas en un terreno plano con la misma configuración de RPT.

Además, los resultados indicaron la necesidad de aumentar el rango manejado de CFO para terrenos no planos puesto que se presentaron valores de flameo superiores a cero en un rango de CFO de hasta 300 kV, mientras que, para topografías planas, el valor de flameo se vuelve nulo al alcanzar un valor de CFO de 100 kV.

## 6. Recomendaciones

Como trabajos futuros, se recomienda analizar la tasa de fallas en la configuración de terreno no plano con topografía en forma de "W", sin la implementación de la resistencia de puesta a tierra (RPT), esto con el fin de evidenciar el efecto de no implementar conexiones a tierra del cable de guarda en terreno no plano. Adicionalmente, se sugiere realizar el cálculo de la tasa de fallas para otras configuraciones de terreno no plano, considerando diferentes disposiciones de las resistencias de puesta a tierra, tomando en cuenta diversos espaciamientos entre ellas.

### Referencias

- Agrawal, A., Price, H., & Gurbaxani, S. (1980). Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field. (págs. 119–129). *IEEE Trans. Electromagn. Compat. EMC-22* (2).
- Ardila, S., Soto, E., & Del Rio, D. (Oct.2019). Flashover rate of an overhead line located on steeped terrain. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.
- Borghetti et al., A., Morched, A. S., Napolitano, F., Nucci, C. A., & Paolone, M. (2005). Lightning-induced overvoltages transferred from medium-voltage to low-voltage networks. (págs. 1-7). St. Petersburg, Russia: 2005 IEEE Russia Power Tech. doi:10.1109/PTC.2005.4524738
- 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., *vol. 22, no. 1*, págs. 684–692.
- Chowdhuri, E., & Gross, T. (1967). Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes. (págs. 1899–1907). *Proc. Inst. Electr. Eng.* 114.
- Cigré Working Group 01 of SC 33. (Oct.1991). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines Cigré., *ref. no.63*.
- Elsherbeni, A., & Demir, V. (2016). *The Finite-Difference Time Domain Method for Electromagnetics with MATLAB(r) Simulations: ACES Series., 2nd ed.*
- Gomez, J. C., & Morcos, M. M. (Oct. 2002). Voltage sag and recovery time in repetitive events. *vol. 17, no. 4*, págs. 1037-1043. in *IEEE Transactions on Power Delivery*. doi:10.1109/TPWRD.2002.803840
- Heidler, F., Cvetic, J. M., & Stanic, B. V. (Apr. 1999). Calculation of lightning current parameters. *vol. 14, no. 2*, págs. 399–404. *IEEE Trans. Power Deliv.* doi:10.1109/61.754080

- Hou, W., Azadifar, M., Rubinstein, M., Rachidi, F., & Zhang, Q. (Oct. 2020). On the Propagation of Lightning-Radiated Electromagnetic Fields Across a Mountain. *vol. 62, no. 5*, págs. 2137-2147. in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. doi:10.1109/TEMC.2019.2947095.
- IEEE Working Group. (July.1990). Calculating the lightning performance of distribution lines. *vol. 5, no. 3*, págs. 1408-1417. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Jurado Machado, M. Á. (2013). Análisis del comportamiento de la líneas aéreas de distribución frente al rayo.
- Liao, Z., Wong, H., Yang, B., & Yuan, Y. (1984). A transmitting boundary for transient wave analysis. (págs. 1063–1076). *Sci. Sin. 27 (10)* .
- Master, M., & Uman, M. (1983). Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole. *vol. 51*, págs. 118-126. *Journal of Physics*.
- Noda, T., Yonezawa, R., Yokoyama, S., & Takahashi, T. (2004). Error in propagation velocity due to staircase approximation of an inclined thin wire in FDTD surge simulation. (págs. 1913–1918). *IEEE Trans. Power Delivery 19 (4)* .
- Nucci et al, C. A., Rachidi, F., Ianoz, M., & .Mazzetti, C. (Feb.1993). Lightning Induced Voltages on Overhead Lines. *vol. 35, no. 1* . *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*.
- Nucci, C. A., Diendorfer, G., Uman, M. A., Rachidi, F., Ianoz, M., & Mazzetti, C. (1990). Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison. En 1990 (Ed.). *vol. 95, no. 12*, págs. 395 – 408. *Journal of. Geophysical Research*.
- Paolone, M. (2001). Modeling of lightning-induced voltages on distribution networks for the solution of power quality problems. PhD thesis.

- Paolone, M., Nucci, C. A., Petrache, E., & Rachidi, F. (Jan. 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. *vol. 19, no. 1*, págs. 423-431. in IEEE Transactions on Power Delivery.
- Perez et al, E. (Nov.2006). Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución.
- Perez, E., Soto, E., & Younes, C. (2014). Influence of non-flat terrain on lightning induced voltages on distribution networks. (págs. 113:115–120). Electric Power Systems Research.
- Power, I., & Society. (2010). IEEE Std 1410 -2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead. *vol. 2010*. Distribution Lines.
- Rachidi, F., & Nucci, C. (1985). Experimental validation of a modification to the transmission line model for LEMP calculations. Zürich, Switzerland: in Proc 8th International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility.
- Soto et al., E., & Perez, E. (Nov. 2019). Lightning-induced voltages on overhead lines over irregular terrains. En N. 2019 (Ed.). *Volume 176*. Electric Power Systems Research.
- Soto, E. A., & Perez, E. (2010). Yaluk Draw. Specialized software for analysis of the performance of distribution lines against lightning strikes. Manizales. Colombia.
- Soto, E., Perez, E., & Herrera, J. (Oct. 2014). Electromagnetic Field Due to Lightning Striking on Top of a Cone-Shaped Mountain Using the FDTD. *vol. 56, no. 5*, págs. 1112-1120. in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. doi:10.1109/TEMPC.2014.2301138.
- Torres, H., & Perez, E. (2010). Modeling and Experimentation of Lightning Induced Transients on Distribution Lines.

- Uman, M., Mclain, K., & Krider, E. (1975). The electromagnetic radiation from a finite antenna. (págs. 33-38). *Am. J. Phys.* 43.
- Yee, K. S. (1966). Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *vol. Ap-14*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- Yokoyama, S. (1986). Distribution Surge Arrester Behavior Due to Lightning Induced Voltages. *vol. 1, no. 1*, págs. 171-178. IEEE Trans. Power Deliv.
- Yokoyama, S. (Jan. 1984). Calculation of lightning-induced voltages on overhead multiconductor systems. *vol. PAS-103*, págs. 100–108. IEEE Trans. Power App. Syst.
- Zhang et al., J. (Oct. 2019). Evaluation of the Lightning-Induced Voltages of Multiconductor Lines for Striking Cone Shaped Mountain. *vol. 61, no. 5*, págs. 1534-1542. in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. doi:10.1109/TEMC.2018.2869752.

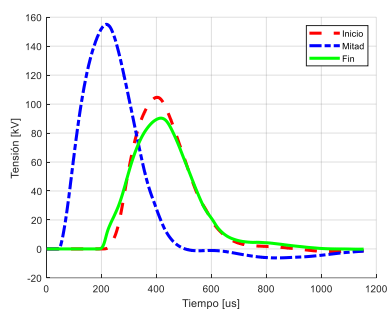
## Apéndice

### Apéndice A. Gráficas de las tensiones inducidas por rayos para cada uno de los eventos

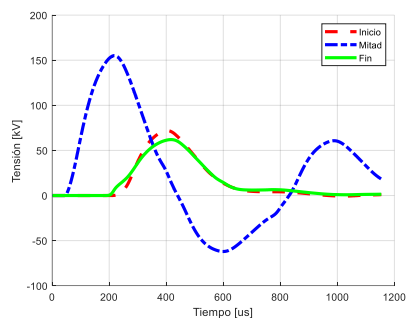
Las gráficas que se presentan a continuación muestran las tensiones máximas inducidas correspondientes a los cinco eventos propuestos en la Figura 6, para tres configuraciones diferentes de resistencia de puesta a tierra en la red de distribución, como se describe en la Sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El cálculo de las tensiones inducidas se realizó en tres puntos de medición comunes en las tres configuraciones: inicio, mitad y fin. Para ello, se utilizó un software desarrollado en MATLAB que implementa la metodología FDTD-3D.

### Figura 8

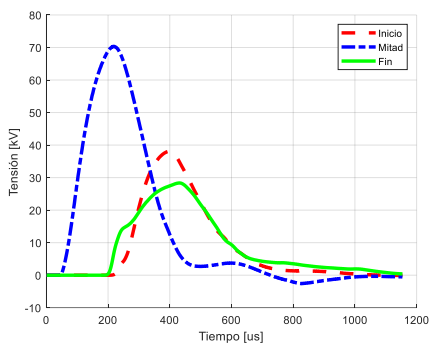
#### Evento 1



a) sin RPT.



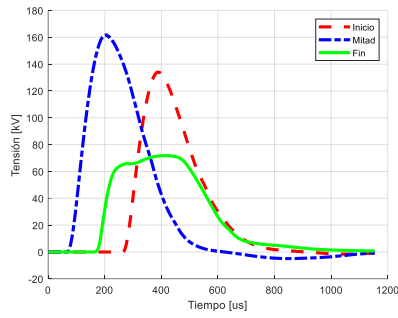
b) RPT al inicio y el final.



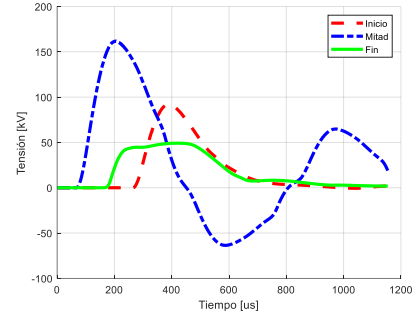
c) RPT cada 500 m.

**Figura 9**

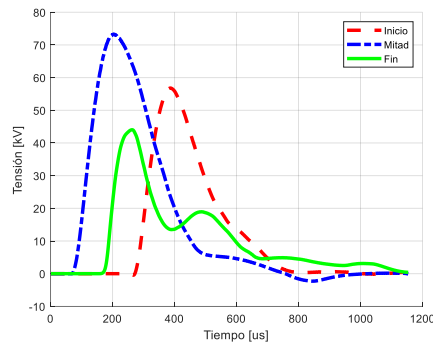
*Evento 2*



**a) sin RPT.**



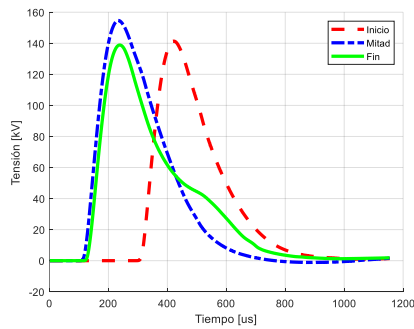
**b) RPT al inicio y el final.**



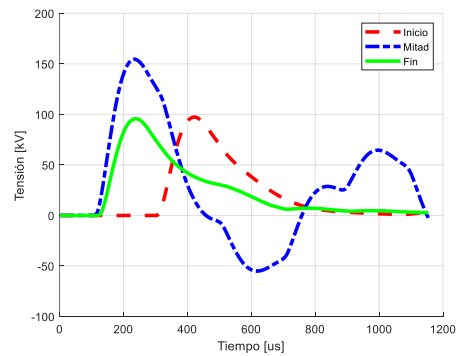
**c) RPT cada 500 m.**

**Figura 10**

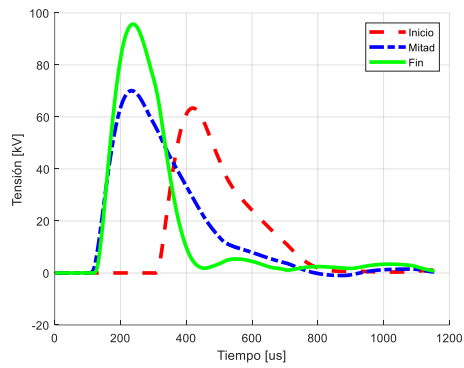
*Evento 3*



**a) sin RPT.**



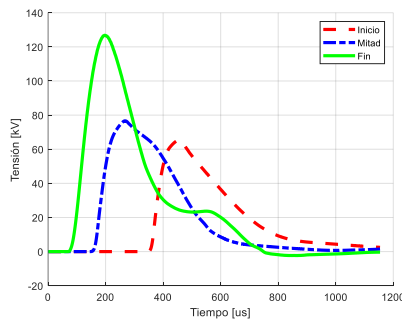
**b) RPT al inicio y el final.**



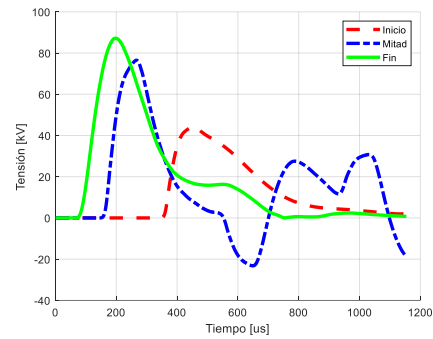
**C) RPT cada 500 m.**

**Figura 11**

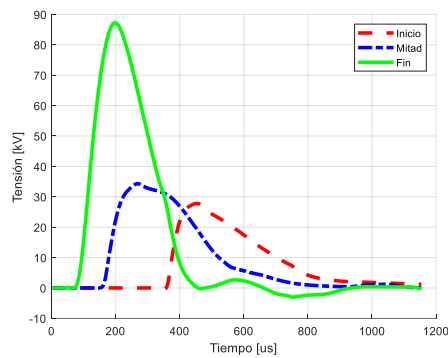
*Evento 4*



**a) sin RPT.**



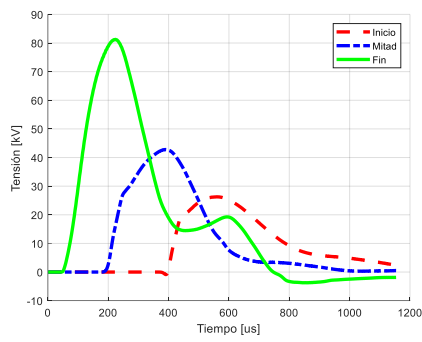
**b) RPT al inicio y el final.**



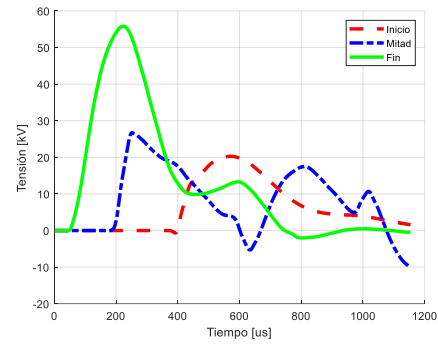
**C) RPT cada 500 m.**

**Figura 12**

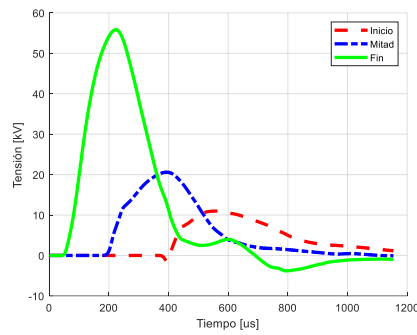
*Evento 5*



**a) sin RPT.**



**b) RPT al inicio y el final.**



**c) RPT cada 500 m.**