

Tasas de fallas de una red de distribución aérea con descargadores de sobretensión ubicada sobre
terreno no plano

Davis Alexander Chavarro Avellaneda

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

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios, mi familia y mi novia por el apoyo brindado en la ejecución de este trabajo de grado y durante toda la carrera.

Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron parte de este proceso, por su apoyo moral y económico en el desarrollo de mi carrera.

Agradezco a mi director de trabajo de grado por su experiencia, conocimiento y tiempo brindado para la culminación de este proyecto de grado.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos por aquellos recuerdos inolvidables en la universidad.

Agradezco a mi novia por su apoyo durante tantos años.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	16
2. Metodología para el cálculo de las tensiones inducidas	17
3. Metodología para calcular la tasa de fallas en terreno irregular	19
4. Configuración simulada	20
5. Resultados	23
5.1. Efecto de los descargadores de sobretensión en las tensiones inducidas por rayos	23
5.2. Tasa de fallas	27
5.2.1. Análisis de los voltajes inducidos	27
5.2.2. Tasas de fallas en las redes de distribución	28
6. Trabajo futuro	30
7. Conclusiones	31
Referencias Bibliográficas	32
Apéndices	37

Lista de Figuras

Figura 1.	Topografía simulada	22
Figura 2.	Especificaciones del terreno	22
Figura 3.	Área de impacto	22
Figura 4.	Posición de los eventos	23
Figura 5.	Tasa de fallas de la red estudiada para los 3 escenarios: a) Terreno plano sin <i>DPS</i> b) Terreno plano con <i>DPS</i> cada 500 m c) Terreno en W con <i>DPS</i> cada 500 m.	29
Figura 6.	Tasa de fallas sin escala logarítmica para los 3 escenarios: a) Terreno plano sin <i>DPS</i> b) Terreno plano con <i>DPS</i> cada 500 m c) Terreno en W con <i>DPS</i> cada 500 m.	30
Figura 7.	Evento 1.	37
Figura 8.	Evento 2.	38
Figura 9.	Evento 3.	39
Figura 10.	Evento 4.	40
Figura 11.	Curva característica <i>V-I</i> del descargador empleado.	41

Lista de Tablas

Tabla 1.	Máximas Tensiones Inducidas Evento 1	24
Tabla 2.	Máximas Tensiones Inducidas Evento 2	25
Tabla 3.	Máximas Tensiones Inducidas Evento 3	25
Tabla 4.	Máximas Tensiones Inducidas Evento 4	26
Tabla 5.	Análisis estadístico	28
Tabla 6.	Porcentajes de variación	29

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Gráficas de las tensiones inducidas por rayos para cada uno de los eventos	37
Apéndice B. Curva ($V-I$) del descargador	41

Resumen

Título: Tasas de fallas de una red de distribución aérea con descargadores de sobretensión ubicada sobre terreno no plano *

Autor: Davis Alexander Chavarro Avellaneda **

Palabras Clave: Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (*FDTD*), tensiones inducidas por rayos, tasa de fallas, terreno no plano, dispositivos de protección contra sobretensiones (*DPS*).

Descripción: Este artículo se dedica a analizar y comparar las respuestas de las tensiones inducidas por rayos al introducir dispositivo de protección contra sobretensiones (*DPS*) tanto al inicio y final de la línea, con a una distancia de separación de 500 *m* entre *DPS*. Esto se lleva a cabo teniendo en cuenta una topografía irregular en forma de “w”, con el propósito de proporcionar una perspectiva para el diseño de líneas aéreas de distribución. Seguidamente se calcula la tasa de fallas de la red aérea de distribución utilizando la configuración de espaciamiento de 500 *m* entre *DPS*. Para llevar a cabo estos cálculos se emplea el método *FDTD-3D* para calcular las tensiones inducidas por rayos, en combinación con el procedimiento de Monte Carlo conforme al estándar *IEEE 1410*. En este proceso se sigue una distribución de probabilidad uniforme para la ubicación de los impactos de rayos, mientras que la corriente pico y el tiempo de frente siguen distribuciones de probabilidad log-normal adoptadas por CIGRÉ. Los resultados se comparan con la tasa de fallas en una red de distribución en terreno plano, evaluando tanto la configuración sin *DPS* como con *DPS* instalados cada 500 *m*. Se concluye que un espaciamiento de 500 *m* entre descargadores proporciona la mejor supresión de sobretensiones, así mismo el efecto de los descargadores en la tasa de fallas es la limitación a valores cercanos a los 30 *kV* y la mejora en el desempeño de la red de distribución con respecto al terreno plano para valores

* 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.

de *CFO* menores a 10 *kV*, pero aumenta las fallas para valores en el rango de 15 a 30 *kV*.

Abstract

Title: Failure rates of an overhead distribution network with surge arresters located on non-flat terrain *

Author: Davis Alexander Chavarro Avellaneda **

Keywords: Finite-Difference Time-Domain (*FDTD*) Method, lightning-induced voltages, flashover rates, Non-flat ground, *DPS*.

Description: This article is dedicated to analyzing and comparing the responses of lightning-induced voltages by introducing the surge protection device (*DPS*) both at the beginning and at the end of the line. With a separation distance of 500 *m* between *DPS*. This is carried out taking into account an irregular “w” shaped topography, with the purpose of providing a perspective for the design of overhead distribution lines. The failure rate of the overhead distribution network is then calculated using the spacing configuration of 500 *m* between *DPS*. To carry out these calculations, the *FDTD-3D* method is used to calculate lightning-induced stresses, in combination with the Monte Carlo procedure according to the *IEEE 1410* standard. In this process, a uniform probability distribution is followed. It is concluded that a spacing of 500 *m* between arresters provides the best surge suppression, likewise the effect of the arresters on the failure rate is the limitation to values close to 30 *kV* and the improvement in the performance of the distribution network with respect to flat terrain for *CFO* values less than 10 *kV* but increases failures for values in the range of 15 to 30 *kV*. For the location of lightning strikes, while the peak current and front time follow log-normal probability distributions adopted by CIGRÉ. The results are compared with the failure rate in a distribution network on flat terrain, evaluating both the configuration without *DPS* and with *DPS* installed every 500 *m*.

* Bachelor Thesis

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

Introducción

La calidad de la energía eléctrica es un término relacionado con la continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión. Existe una gran cantidad de eventos que pueden afectar la calidad del servicio como lo son: fallas temporales, fallas permanentes, operaciones de maniobra y descargas atmosféricas. La mayoría de las fallas en los sistemas eléctricos son de naturaleza temporal, y las descargas atmosféricas tienen un rol preponderante en este tipo de situaciones (Ramírez and Cano, 2006).

Las tensiones inducidas por rayos son la causa más común de fallas en las redes de distribución aéreas debido a la mayor frecuencia de los impactos indirectos frente a los impactos directos y al bajo nivel de aislamiento de las redes de distribución provocando descargas disruptivas de el aislamiento (Iee, 2004). Para su remoción es necesario el uso de reconectadores (recloser), los cuales determinan la disminución temporal de la tensión de alimentación, es decir los huecos de tensión (Nucci et al., 2002). Estas caídas de tensión afectan la calidad de la energía y provocan un considerable mal funcionamiento en un gran número de aparatos (Bollen, 1996)(Khergade et al., 2021).

Se pueden identificar numerosos factores que influyen en los valores máximos de las tensiones inducidas por rayos. Entre ellos se incluyen la altura de la línea, la conductividad del terreno, las ramificaciones de la línea, la presencia de cables de guarda, los dispositivos de protección con-

tra sobretensiones (*DPS*), así como la topografía del terreno. En este artículo, se abordan los dos últimos factores.

Últimamente, se ha dedicado un interés significativo al impacto que tienen las topografías irregulares en la evaluación de los campos electromagnéticos generados por descargas atmosféricas, así como en la determinación de los voltajes inducidos por estas descargas. Este enfoque responde a la comprensión de que la topografía irregular del terreno tiene un efecto sustancial en la propagación de las ondas electromagnéticas generadas por los rayos, lo que a su vez influye en la respuesta eléctrica y magnética del entorno circundante.

Soto (Soto et al., 2014) calculó los campos electromagnéticos sobre tres configuraciones diferentes de terrenos no planos, mediante el método *FDTD-2D*, seguidamente calculó las tensiones inducidas mediante el modelo de acople de Agrawal, encontrando importantes diferencias entre las tensiones inducidas por rayos sobre terreno irregular en comparación con el cálculo tradicional considerando terreno llano.

Zhang (Zhang et al., 2018) evaluó los voltajes inducidos por rayos en dos configuraciones típicas de líneas multiconductoras, tanto con cables de guarda como sin ellos, en un terreno con pérdidas en forma de cono. Sus resultados revelaron un aumento en las tensiones inducidas en comparación con las que se obtendrían en un terreno plano. Además, Zhang observó que a medida que aumenta el ángulo de inclinación de la montaña, se producen valores máximos más elevados

en los voltajes inducidos por rayos. También se encontró que el uso de cables de guarda resulta efectivo para reducir los voltajes inducidos en ambos extremos de las líneas.

En su estudio, Soto (Soto and Perez, 2019) investiga las tensiones inducidas por rayos en líneas de distribución que atraviesan terrenos irregulares. Para llevar a cabo este análisis, Soto et al. emplea un enfoque basado en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (*FDTD*) para calcular las tensiones inducidas por rayos. Los resultados de su investigación revelan que, en la mayoría de los casos, las tensiones inducidas por rayos en redes aéreas ubicadas sobre topografías irregulares son superiores a las que se registran en terrenos planos.

Una de las primeras investigaciones en la protección de líneas de distribución con *DPS* fue estudiada por Yokoyama (Yokoyama, 1986) cuyo estudio se centró en evaluar la protección de una red de distribución de 6,6 kV, mediante el uso de descargadores de sobretensión ante las tensiones inducidas por rayos en terreno plano. Sus conclusiones destacaron que la distancia óptima entre los descargadores para lograr la mejor protección es de 200 m para esta red.

En otro estudio (Paolone et al., 2004), se examinó el efecto del espaciamiento entre dos descargadores de sobretensión contiguos en relación con la máxima tensión inducida a lo largo de la red. Este análisis arrojó que separaciones de 200 m entre los descargadores proporcionan el mejor rendimiento.

Asimismo, en un tercer estudio (Soto et al., 2019) se introdujo por primera vez la consideración de descargadores de sobretensión en terrenos irregulares, al estudiar el impacto de los *DPS* en el cálculo de las tensiones inducidas provocadas por impactos puntuales de rayos sobre cuatro configuraciones de terreno irregular. Los dispositivos de protección contra sobretensiones se colocaron al inicio de la línea, al final de la línea y tanto al inicio como al final de la línea. Los resultados revelaron que, dependiendo de las configuraciones, la ubicación de los descargadores y la posición del impacto, las tensiones inducidas varían o son muy similares al caso de topografía plana, como el caso de la configuración “v” invertida.

A. Borghetti et al. en (Borghetti et al., 2007), calcularon las tasas de fallas de una red de distribución con descargadores ubicados a intervalos de 500 m y 200 m, demostrando que la última configuración con un espaciamiento de 200 m conlleva a una reducción en las fallas de la red de distribución.

Soto et al. (Soto et al., 2022) calcula la tasa de fallas de una red aérea de distribución que cruza dos montañas, utilizando el método *FDTD-3D* para el cálculo de las tensiones inducidas y el procedimiento de Monte Carlo de acuerdo con el estándar *IEEE 1410*, los impactos en la coordenada z siguieron distribuciones de probabilidad uniforme y exponencial revelando un aumento considerable en la tasa de fallas con respecto al terreno plano.

En este artículo se analiza las tensiones inducidas por rayos en una red aérea de distribución

sobre una topografía irregular en forma de W, al introducir descargadores de sobretensión sobre la red. Seguidamente se calcula la tasa de fallas en la red de distribución empleando descargadores de sobretensión y se finaliza comparando la tasa de fallas de la red con la tasa de fallas que se presenta en una topografía llana.

Este documento está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 2, se presenta la metodología para calcular las tensiones inducidas por rayos en topografía irregular usando el método *FDTD-3D*. Además, se describe como se integran la red de distribución, el canal de la descarga y los *DPS* en el método *FDTD-3D*. En el Capítulo 3, se describe la metodología para determinar la tasa de fallas en terrenos irregulares. El Capítulo 4 se dedica a la descripción del caso simulado, incluyendo una descripción del terreno, la red aérea de distribución y las configuraciones de los *DPS*. En el Capítulo 5, se presentan los resultados de las máximas tensiones inducidas por rayos al usar *DPS*, y la tasa de fallas de la línea, tomado como puntos de medición el inicio, la mitad y el final de la red. En el Capítulo 7, se exponen las conclusiones. Finalmente en el Capítulo 6, trabajos futuros.

1. Objetivos

Objetivo general

Calcular la tasa de fallas de una red de distribución aérea con descargadores de sobretensión ubicada sobre una configuración de terreno no plano.

Objetivos específicos

Calcular la tasa de fallas por rayos en una red de distribución aérea con dispositivos de protección contra sobretensiones (*DPS*), ubicada sobre una topografía irregular;

Estimar el efecto que tiene la variación de la distancia de separación entre los dispositivos de protección contra sobretensiones (*DPS*), en una red de distribución ubicada sobre una topografía irregular;

Concluir sobre el efecto que tiene la distribución espacial entre dispositivos de protección contra sobretensiones (*DPS*) en una red ubicada sobre una topografía irregular y sus causalidades en el cálculo de la tasa de fallas.

2. Metodología para el cálculo de las tensiones inducidas

Para el cálculo de las tensiones inducidas y la tasa de fallas en terreno plano se usó un software especializado para el análisis y desempeño de líneas de distribución ante impactos de rayos denominado Yaluk-Draw (Pérez and Soto, 2013) el cual obtiene el campo electromagnético mediante las ecuaciones de Master y Uman (Uman et al., 1975) y utiliza el método de acople de Agrawal para calcular las tensiones inducidas en la red aérea. La tasa de fallas de la red es determinada por el software de acuerdo con el estándar *IEEE 1410* (Iee, 2004).

Las tensiones inducidas por rayos en redes aéreas de distribución situadas sobre terreno irregular se calculan usando una metodología de análisis de onda completa basada en el método *FDTD-3D* (Yee, 1966)(Elsherbeni and Demir, 2016).El método *FDTD-3D* actualiza los campos eléctricos E_x, E_y, E_z y magnéticos H_x, H_y, H_z en todo el subdominio cúbico del espacio.

Este procedimiento se escogió por encima de la metodología *FDTD-2D* a pesar de que esta última requiere menos memoria de cálculo. La metodología *FDTD-3D* permite la inclusión de terrenos con mayor detalle en cambio el método *FDTD-2D* requiere simetría rotacional para representar un espacio en *3D*.

La red aérea de distribución se extiende a lo largo de la dirección x y se presenta como un alambre delgado según (Noda and Yokoyama, 2002)(Noda et al., 2004) forzando a los campos eléctricos a lo largo de la línea a ser cero y actualizando los parámetros μ y ϵ de manera diferente que el resto del espacio de trabajo.

El canal de la descarga de retorno está representado por el modelo *MTLE* (Pérez and Torres,

2010) con una constante de atenuación $\lambda = 2000$. La corriente en la base del canal se representa por una onda tipo Heidler (Heidler et al., 1999).

La representación de los descargadores de sobretensión en el algoritmo *FDTD-3D*, se hace mediante técnicas para la incorporación de dispositivos no lineales (Elsherbeni and Demir, 2015). Se discretiza la curva (*V-I*) del *DPS* obtenidas de las hojas de datos del fabricante (SIEMENS, 2011)(esp, 2015) y se actualiza el campo eléctrico situado alrededor del dispositivo no lineal como en (Soto et al., 2019). La ecuación para actualizar el campo eléctrico situado alrededor del dispositivo no lineal está dada por las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$E^{n+1} = \frac{1-C}{1+C}E^n + \frac{\Delta t}{(1+C)\epsilon}(\nabla \times H). \quad (1)$$

Donde:

$$C = \frac{\Delta t}{2 \cdot R_k \cdot \epsilon \cdot \Delta_s}, \quad (2)$$

y

$$R_k = \frac{V_{k+1} - V_k}{I_{k+1} - I_k}. \quad (3)$$

Para la configuración de terreno irregular se eligió un volumen de trabajo adecuado y se utilizó una resolución espacial de 5 m, esta topografía irregular se modela mediante escaleras por debajo de las cuales la conductividad toma un valor alto para representar un terreno sin pérdidas. Para limitar el espacio computacional, todas las superficies cúbicas se trataron como límites absorbentes de segundo orden de Liao (Liao et al., 1984).

3. Metodología para calcular la tasa de fallas en terreno irregular

La determinación de la tasa de fallas en una red de distribución se obtiene de acuerdo con el estándar *IEEE 1410* (Iee, 2004). Este proceso implica 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 línea. El software empleado fue desarrollado en la herramienta Matlab y se basa en el método *FDTD-3D* para calcular las tensiones inducidas en redes aéreas que atraviesan terrenos irregulares, siguiendo la metodología descrita en la Sección 2. Los siguientes pasos resumen el procedimiento para calcular la tasa de fallas de una red de distribución ubicada en terreno con topografía irregular.

1. Se genera de manera aleatoria un gran número de impactos alrededor de la línea. 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_0 , Y_0 , y la altura Z_0 del impacto. Los valores de I_p y t_f siguen las distribuciones de probabilidad log-normal establecidas por *CIGRÉ* (of SC33, 1991). Las coordenadas X_0 y Y_0 siguen distribuciones de probabilidad uniforme y con el fin de que los voltajes inducidos solo estén influenciados por la topografía del terreno, Z_0 también sigue una distribución uniforme .
2. Para cada evento, se verifica si el impacto es directo utilizando el modelo electro-geométrico (wor, 1990). Si el impacto es directo, el evento no se simula.
3. Luego, se procede a calcular la tensión inducida por el rayo para cada evento utilizando

el software desarrollado en Matlab. Para cada evento, se obtiene el voltaje máximo en tres puntos de medición, que corresponden al inicio, la mitad y el final de la línea, es en estos lugares donde pueden surgir eventos de flameo, ya que la línea debe estar soportada por estructuras en esos puntos. La cantidad anual de fallas se determina mediante la siguiente fórmula:

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

donde:

$n \rightarrow$ Número de eventos que superan el *CFO* de la línea,

$n_{tot} \rightarrow$ Número total de simulaciones,

$N_g \rightarrow$ Densidad de descargas a tierra,

$A \rightarrow$ Área de impacto en $[km^2](X_{m\acute{a}x} \cdot Y_{m\acute{a}x})$.

4. Configuración simulada

La topografía irregular simulada se muestra en la Figura 1; tiene un ancho de 2400 *m*, un largo de 1400 *m*, y una altura máxima de 200 *m*.

Las partes huecas de la W están constituidas por 2 valles de 50 *m* de ancho cada uno. En medio de estos valles está una elevación del terreno, imitando una montaña donde en su parte más elevada existe una planicie de 50 *m*; la altura de esta elevación depende del ángulo θ que para este artículo se asume de 20°, ver Figura 2. La conductividad del terreno se asume infinita y la

permitividad relativa 10.

La red aérea de distribución es un solo conductor con una longitud de 1 *km*, un radio de 5 *mm*, soportados sobre tres postes de 10 *m* de altura conectado a su impedancia de sobretensión en ambos extremos. Se supone que la resistencia en corriente directa (*DC*) de la red es de 0,5 Ω/km .

Para evaluar el impacto de los *DPS* en la red de distribución situada en el terreno irregular descrito, se realizaron simulaciones aleatorias en tres escenarios diferentes. En el primero, se simuló la red sobre el terreno irregular sin la presencia de *DPS*. En el segundo, se incorporó los *DPS* al inicio y al final de la línea. Y en el tercer caso, se colocaron *DPS* a intervalos de 500 *m* a lo largo de la línea. La corriente en la base del canal se modeló mediante la función de Heidler, ajustada para seguir el valor de t_f del numeral 1. Las coordenadas de los impactos siguen distribuciones de probabilidad uniforme.

La evaluación de la tasa de fallas se lleva a cabo siguiendo la metodología de la Sección 3. El canal de la descarga de retorno está representado por el modelo *MTLE* con una constante de atenuación $\lambda = 2000$, una velocidad de descarga de retorno de 130 *m/μs* y una altura de 1,4 *km*. La corriente en la base del canal se modela utilizando una función de Heidler, la cual se ajusta para que siga el valor de t_f del numeral 1. Las coordenadas de los impactos, son seleccionados siguiendo las distribuciones de probabilidad que se detallan en la metodología correspondiente.

El área de impacto simulada para el cálculo de la tasa de fallas se define tomando en cuenta los impactos a una distancia de 1,5 *km* desde el centro de la línea en la dirección *X* y a 1 *km* en la dirección *Y*, tal como se muestra en la Figura 3. Esto se realiza siguiendo lo hecho por Borghetti en artículos previos. Se estableció una distancia de 200 *m* entre la línea y el área de impacto hasta

los límites de *LIAO*, con el propósito de prevenir perturbaciones en los voltajes calculados. Esto permite simular un área total de $2400 \cdot 1400 \cdot 1200 \text{ m}^3$. El tiempo máximo de simulación fue de $10 \mu\text{s}$.

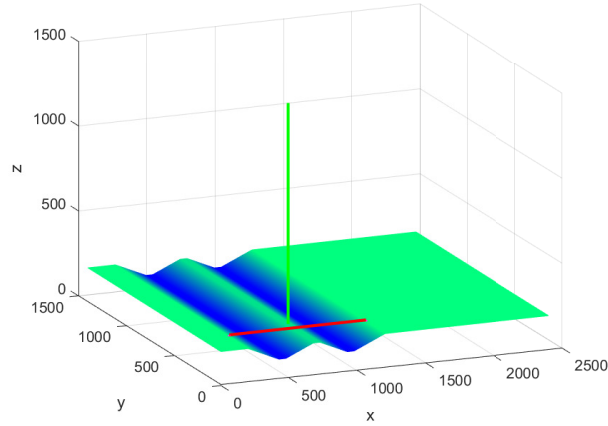


Figura 1. Topografía simulada

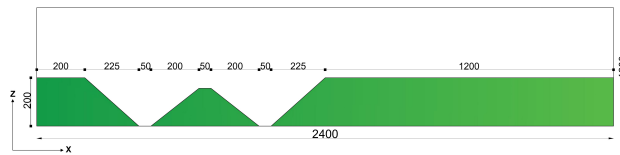


Figura 2. Especificaciones del terreno

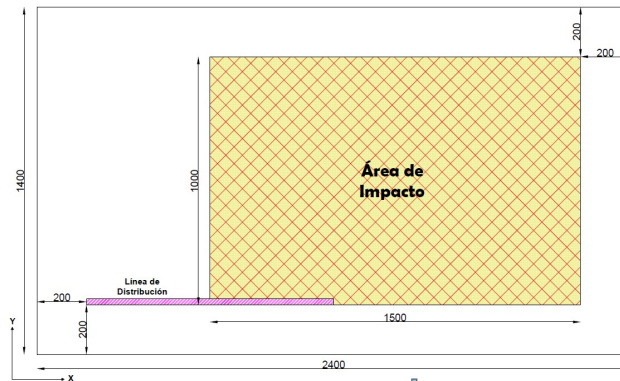


Figura 3. Área de impacto

5. Resultados

5.1. Efecto de los descargadores de sobretensión en las tensiones inducidas por rayos

Aquí se presentan cuatro eventos simulados como se muestran en la Figura 4, cada uno con sus respectivos parámetros aleatorios que siguen las distribuciones de probabilidad establecidas en la Sección 4. La selección de estos cuatro eventos se realizó con el propósito de destacar tanto los efectos positivos como los negativos que los *DPS* pueden tener en la configuración del terreno en forma de W. El primer escenario donde se simularon los eventos, es una red de distribución de 1 km sin *DPS*; para el segundo escenario se incluyen los *DPS* al inicio y al final de la red; y el último escenario emplea *DPS* espaciados cada 500 m. Las gráficas correspondientes a estos eventos se encuentran detalladas en el Apéndice 1.

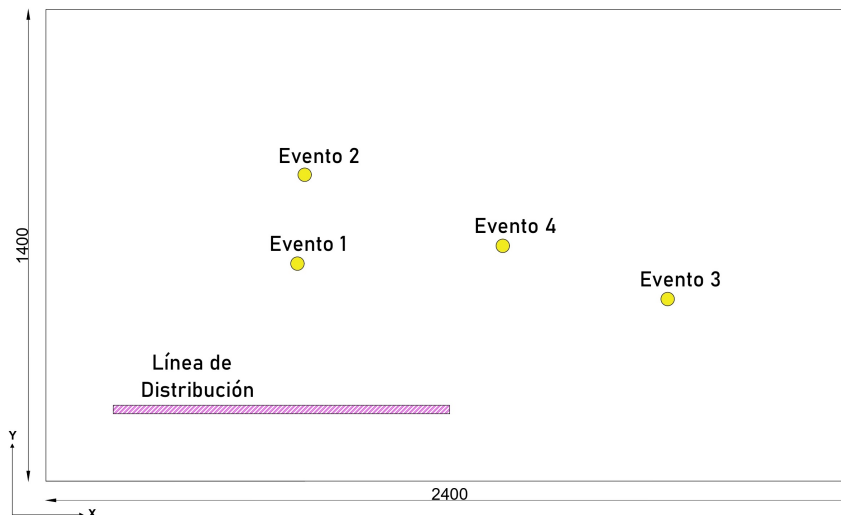


Figura 4. Posición de los eventos

Evento 1. En este escenario, la corriente presenta una magnitud de 100.9 kA , un tiempo de frente de $2.2 \mu\text{s}$, y la posición del impacto se produce en las coordenadas $x = 747.7$, $y = 645.5$ y z sobre el terreno. En la Tabla 1, se detallan los valores máximos de las tensiones inducidas al inicio, en la mitad y al final de la línea, tanto cuando se utiliza *DPS* como cuando no se emplean.

Tabla 1
Máximas Tensiones Inducidas Evento 1

Tensión máx [kV]	Sin <i>DPS</i>	<i>DPS</i> al inicio y al final	<i>DPS</i> cada 500 m
Inicio	209.2	33.7	33.7
Mitad	254.6	510.8	28.8
Final	220.2	33.3	33.4

La implementación de descargadores en los extremos de la línea logró una disminución de las máximas tensiones inducidas en esos puntos. Sin embargo, en el punto intermedio de la red, se registró un aumento del 101% en comparación con la configuración sin *DPS*. En contraste, la colocación de descargadores cada 500 m demostró ser una estrategia altamente efectiva para reducir de manera significativa las tensiones inducidas por los rayos en los puntos de inicio, la mitad y el final de la línea, con una reducción promedio del 86% para este evento.

Evento 2. Este evento, la corriente presenta una magnitud de 56.1 kA , un tiempo de frente de $4.09 \mu\text{s}$, y la posición del impacto se produce en las coordenadas $x = 769.2$, $y = 909.3$ y z sobre el terreno. En la Tabla 2, se detallan los valores máximos de las tensiones inducidas al inicio, en la mitad y al final de la línea, tanto cuando se utiliza *DPS* como cuando no se emplean.

Este evento presenta una particularidad en comparación con el Evento 1. Al emplear *DPS*

Tabla 2

Máximas Tensiones Inducidas Evento 2

Tensión máx [kV]	Sin DPS	DPS al inicio y al final	DPS cada 500 m
Inicio	42	30	30
Mitad	44.8	44.8	23.4
Final	47.7	29.3	29.2

en los puntos de inicio y final de la línea, se observa que la tensión máxima inducida en la mitad de la línea permanece constante. Sin embargo, cuando se implementa el uso de DPS cada 500 m, se confirma una vez más la efectiva reducción de las tensiones inducidas en los tres puntos de medición.

Evento 3. En este impacto, la corriente presenta una magnitud de 51.6 kA, un tiempo de frente de 1.37 μs , y la posición del impacto se produce en las coordenadas $x = 1848.2$, $y = 540.3$ y z sobre el terreno. En la Tabla 3, se detallan los valores máximos de las tensiones inducidas al inicio, en la mitad y al final de la línea, tanto cuando se utiliza DPS como cuando no se emplean.

Tabla 3

Máximas Tensiones Inducidas Evento 3

Tensión máx [kV]	Sin DPS	DPS al inicio y al final	DPS cada 500 m
Inicio	12.1	28.7	28.7
Mitad	21.6	27.5	24.7
Final	51.1	29.7	29.6

En este evento, el empleo de DPS tanto al inicio como al final, así como cada 500 m, conduce a una disminución únicamente de la tensión máxima inducida al final de la línea. Sin embargo, esto se acompaña de un aumento en las tensiones inducidas al inicio y mitad de la línea.

Es importante destacar que el incremento más significativo se observa en el inicio de la línea, con una variación del 136 % en ambos eventos de espaciamiento de los *DPS*.

Evento 4. En este escenario, la corriente presenta una magnitud de 10.1 kA, un tiempo de frente de 1.58 μs , y la posición del impacto se produce en las coordenadas $x = 1358.1$, $y = 698.3$ y z sobre el terreno. En la Tabla 4, se detallan los valores máximos de las tensiones inducidas al inicio, en la mitad y al final de la línea, tanto cuando se utiliza *DPS* como cuando no se emplean.

Tabla 4
Máximas Tensiones Inducidas Evento 4

Tensión máx [kV]	Sin <i>DPS</i>	<i>DPS</i> al inicio y al final	<i>DPS</i> cada 500 m
Inicio	2.8	28.3	28.1
Mitad	6.2	21.6	23.7
Final	13.9	29.5	29.6

Este evento presenta unas tensiones inducidas bajas debido a la ubicación del impacto y la magnitud de la corriente.

El principal efecto de los descargadores sobre las tensiones inducidas por rayos fue limitar las tensiones inducidas a valores cercanos a 30 kV. Esto debido a que los *DPS* llegan a su valor de saturación. Ver Apéndice 2.

Gran parte de los eventos que se simularon aleatoriamente, presentan una reducción significativa de las tensiones inducidas al usar *DPS* espaciados 500 m en los puntos donde se puede producir flameo. El uso de descargadores al inicio y final de la red mitigó en varios eventos las tensiones inducidas en esos puntos. Sin embargo, en la mitad de la red presentan un aumento de la

tensión como en el Evento 1 que alcanza una magnitud superior a los 500 kV.

Impactos que ocurren de forma lateral a la línea y con una magnitud de corriente relativamente baja en comparación con el Evento 1, presentan tensiones inducidas bajas sin emplear *DPS*. Aunque, el uso de descargadores en estos eventos aumenta las tensiones inducidas, limitándolas aproximadamente a 30 kV.

5.2. Tasa de fallas

Como se estableció previamente Z_0 sigue una distribución de probabilidad uniforme con el objetivo que los voltajes inducidos solo estén influenciados por la topografía del terreno. La comparación de las tasas de fallas se realiza considerando los siguientes escenarios:

- a Terreno plano sin *DPS*.
- b Terreno plano con *DPS* cada 500 m.
- c Terreno irregular en forma de W con *DPS* cada 500 m.

5.2.1. Análisis de los voltajes inducidos. Se realizó un análisis estadístico de las tensiones máximas inducidas en la red considerando los 3 puntos de medición. Los resultados se aprecian en la TABLA 5. Debido al mayor costo computacional del algoritmo *FDTD-3D*, se realizaron un menor número de simulaciones.

El valor máximo de las tensiones inducidas en la Tabla 5 confirma que para esta topografía, el descargador (SIEMENS, 2011)(esp, 2015) espaciado 500 m limitan las tensiones a un valor aproximado de 30 kV.

Tabla 5
Análisis estadístico

Parámetros	Terreno plano sin <i>DPS</i>	Terreno plano con <i>DPS</i> cada 500 <i>m</i>	Terreno irregular en forma de <i>W</i> con <i>DPS</i> cada 500 <i>m</i>
Simulaciones	9793	9793	264
Mediana [<i>kV</i>]	14	14	14.4
Media [<i>kV</i>]	22.5	16	14.2
Des. Estándar [<i>kV</i>]	27.8	9.9	12
Val. Mínimo [<i>kV</i>]	0.2	0.2	0
Val. Máximo [<i>kV</i>]	504.2	85.6	34.2

5.2.2. Tasas de fallas en las redes de distribución. Utilizando la metodología conforme al estándar *IEEE 1410* (Iee, 2004) en terrenos planos y siguiendo el enfoque presentado en la Sección 4 con la Ecuación (4) para terrenos irregulares, se calcula la tasa de fallas en la red de distribución para los tres escenarios. Estos resultados se muestran gráficamente en la Figura 5. Es esencial resaltar que, al calcular la tasa de fallas de la línea, se tuvieron en cuenta las tensiones máximas registradas en los tres puntos de medición ubicados al inicio, en la mitad y al final de la red de distribución. Dado que son estos puntos de medición en los que se puede producir flameo, debido a la presencia de la estructura que soporta la red de distribución.

Para un valor de *CFO* de 25 *kV*, la curva (c) muestra un incremento máximo en la tasa de fallas del 88% en comparación con la curva (a) y del 106% en comparación con la curva (b). Es importante destacar que a pesar de que la red en (c) cuenta con descargadores cada 500 metros, se presentaron incrementos en la tasa de fallas, esto respalda lo que se ha señalado en la literatura (Soto et al., 2014)-(Soto and Perez, 2019),(Soto et al., 2022), donde se establece que las tensiones

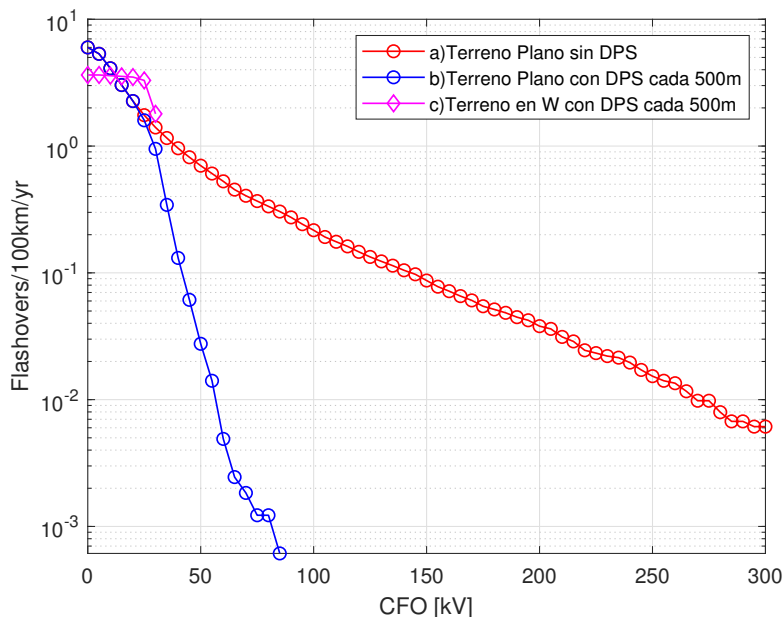


Figura 5. Tasa de fallas de la red estudiada para los 3 escenarios: a) Terreno plano sin DPS b) Terreno plano con DPS cada 500 m c) Terreno en W con DPS cada 500 m.

inducidas por rayos en terrenos irregulares son significativamente mayores que las que se registran en terrenos planos. Los porcentajes de variación de la curva (c) respecto a las curvas (a) y (b) se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6
Porcentajes de variación

CFO	Variación respecto a (a)	Variación respecto a (b)
0	-39	-39
5	-32	-32
10	-13	-13
15	17	17
20	55	55
25	88	106
30	28	89

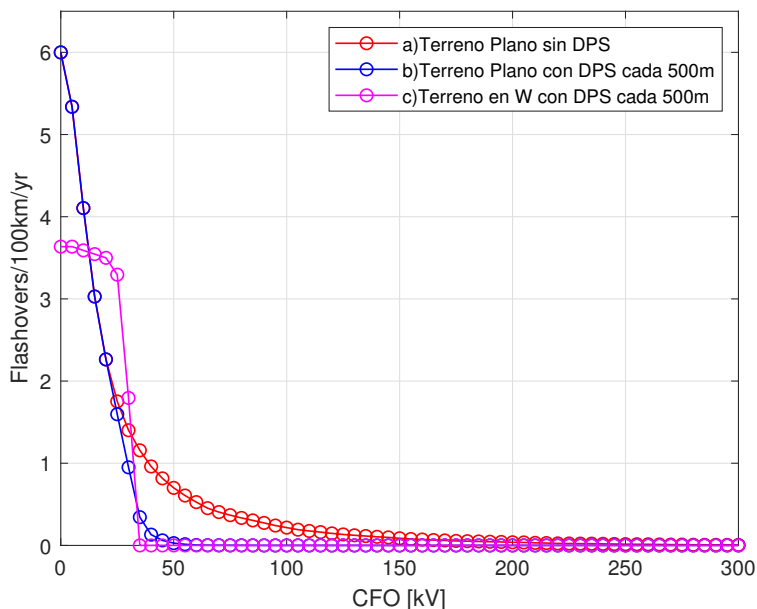


Figura 6. Tasa de fallas sin escala logarítmica para los 3 escenarios: a) Terreno plano sin *DPS* b) Terreno plano con *DPS* cada 500 m c) Terreno en W con *DPS* cada 500 m.

En las curvas (b) y (c) de la Figura 6 se puede apreciar mejor el efecto de los descargadores sobre la red de distribución, al limitar las tensiones inducidas por rayos. Debido a que los descargadores están ubicados en los puntos de medición y las tensiones inducidas llegaron a valores de aproximadamente 30 kV el cual corresponde al nivel de saturación del *DPS*, la tasa de fallas se limita a un valor de *CFO* aproximado de 30 kV.

6. Trabajo futuro

Se propone analizar la tasa de fallas en esta misma configuración de terreno irregular sin hacer uso de descargadores y de igual forma realizar el cálculo de la tasa de fallas en otro tipo de topografías irregulares con el fin de concluir sobre el comportamiento de las descargas en las redes de

distribución y el nivel de aislamiento requerido en las líneas que atraviesan terrenos irregulares.

7. Conclusiones

En este artículo, se realizó un análisis del impacto de los Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (*DPS*) en una red de distribución sobre una topografía en forma de W. Este estudio se basó en simulaciones de impactos aleatorios que permiten evaluar las tensiones inducidas en los tres puntos cruciales de la línea en donde puede ocurrir un flameo: el inicio, la mitad y el final.

En general, se observó que en las ubicaciones donde se instalaron los descargadores, las tensiones inducidas se limitaron a alrededor de 30 kV , esto debido a la saturación del descargador.

La configuración de los Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (*DPS*) con un espaciamiento de 500 m sobre una topografía en forma de W demostró ser eficaz en la supresión de sobretensiones. Estos resultados respaldan la importancia de una disposición estratégica de los *DPS* para optimizar la protección en redes de distribución en terrenos irregulares.

Se calculó la tasa de fallas de una línea de 1 km de longitud que atraviesa un terreno en forma de W. Se utilizó una combinación de dos métodos, el *FDTD-3D* para calcular las tensiones inducidas y el método de Montecarlo para simular los impactos de manera aleatoria.

La tasa de fallas de la red de distribución sobre topografía en forma de W usando descargadores cada 500 m , limita el cálculo a valores de *CFO* de 30 kV aproximadamente debido al efecto de los *DPS* en la red de distribución. Los resultados de la tasa de fallas permiten dar una perspec-

tiva en el diseño de redes de distribución ubicadas en una topografía en forma de W ayudando a mejorar la confiabilidad del sistema.

El uso de descargadores de sobretensión cada 500 *m* mejora el desempeño de la red de distribución ubicada sobre una topografía en forma de W con respecto al terreno plano para valores de *CFO* menores a 10 *kV*, pero aumenta las fallas para valores en el rango de 15 a 30 *kV*.

Referencias Bibliográficas

- (1990). Working group report: calculating the lightning performance of distribution lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3):1408–1417.
- (2004). Ieee guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines. *IEEE Std 1410-2004 (Revision of IEEE Std 1410-1997)*, pages 1–50.
- (2015). Especificación técnica para descargadores de sobretensiones DPS en media tensión. <https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Energia/EspecificacionesTecnicas/DPS/ET%20Descargadores%20sobretensiones%20Media%20Tensi%C3%B3n%20junio%202015.pdf>.
- Bollen, M. (1996). Voltage sags: effects, mitigation and prediction. *Power Engineering Journal*, 10(3):129–135.
- Borghetti, A., Nucci, C. A., and Paolone, M. (2007). An improved procedure for the assessment of overhead line indirect lightning performance and its comparison with the ieee std. 1410 method. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 22:684 – 692.
- Elsherbeni, A. and Demir, V. (2015). *The Finite-Difference Time-Domain in Electromagnetics*. Electromagnetic Waves. Institution of Engineering and Technology.
- Elsherbeni, A. and Demir, V. (2016). *The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MATLAB® simulations: ACES series, 2nd edition*.

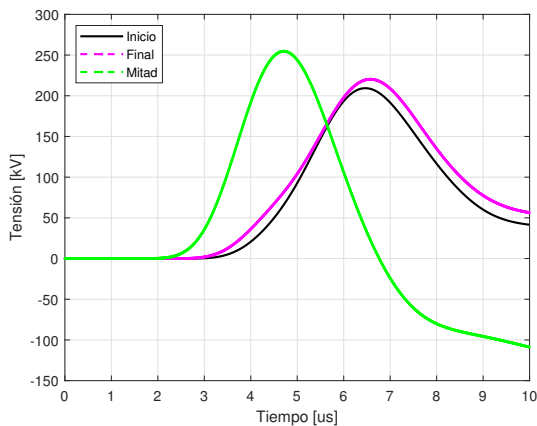
- Heidler, F., Cvetic, J., and Stanic, B. (1999). Calculation of lightning current parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2):399–404.
- Khergade, A., Satputaley, R., and Patro, S. (2021). Investigation of voltage sags effects on asd and mitigation using esrf theory-based dvr. *IEEE Transactions on Power Delivery*, PP:1–1.
- Liao, Z. P., Wong, H. L., Yang, B. P., and Yuan, Y. F. (1984). A transmitting boundary for transient wave analyses. *Scientia Sinica (series A)*, 17:1063 – 1076.
- Noda, T. and Yokoyama, S. (2002). Thin wire representation in finite difference time domain surge simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(3):840–847.
- Noda, T., Yonezawa, R., Yokoyama, S., and Takahashi, Y. (2004). Error in propagation velocity due to staircase approximation of an inclined thin wire in fdtd surge simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(4):1913–1918.
- Nucci, C., Paolone, M., and Bernardi, M. (2002). Use of lightning location systems data in integrated systems for power quality monitoring. In *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, volume 1, pages 552–556 vol.1.
- of SC33, C. G. . (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transactions lines cigré. ref. no. 63.
- Paolone, M., Nucci, C., Petrache, E., and Rachidi, F. (2004). Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding

- wires and of surge arresters: modeling and experimental validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1):423–431.
- Pérez, E. and 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*, 4(1):1–8.
- Pérez, E. and Torres, H. (2010). Modeling and experimentation of lightning induced transients on distribution lines.
- Ramírez, S. and Cano, E. (2006). *Calidad del servicio de energía eléctrica*. Universidad Nacional de Colombia.
- SIEMENS (2011). Descargadores de sobretensión de media tensión 3EK4 con envoltente de silicona. Siemens AG, Erlangen, Alemania.
- Soto, E., Árdila, S., and Del Río, D. (2022). Flashover rate of on overhead line located on a steeped terrain. In *International conference on lightning Protection (ICLP)*.
- Soto, E., Martínez, D., and Verdugo, D. (2019). Comportamiento de descargadores de sobretensión ante tensiones inducidas por rayos sobre líneas de distribución ubicadas en zona montañosa. *TecnoLógicas*, 22:157–173.
- Soto, E. and Perez, E. (2019). Lightning-induced voltages on overhead lines over irregular terrains. *Electric Power Systems Research*, 176:105941.

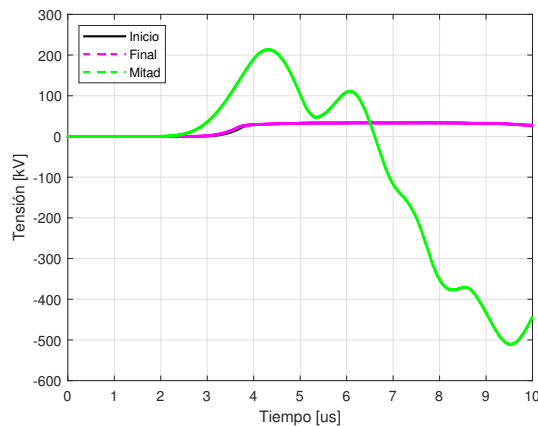
- Soto, E., Perez, E., and Younes, C. (2014). Influence of non-flat terrain on lightning induced voltages on distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 113:115–120. Lightning Research and Lightning Protection Technologies.
- Uman, M., Mclain, K., and Krider, E. (1975). The electromagnetic radiation from a finite antenna. *American Journal of Physics*, 43:33–38.
- Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3):302–307.
- Yokoyama, S. (1986). Distribution surge arrester behavior due to lightning induced voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1(1):171–178.
- Zhang, J., Zhang, Q., Hou, W., Zhang, L., Zhou, F., Ma, Y., and Ma, Y. (2018). Evaluation of the lightning-induced voltages of multiconductor lines for striking cone-shaped mountain. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, PP:1–9.

Apéndices

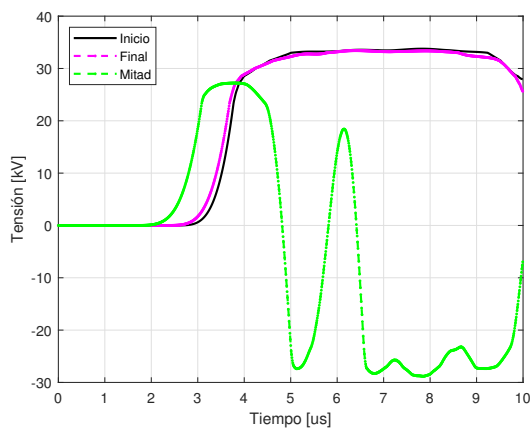
Apéndice A. Gráficas de las tensiones inducidas por rayos para cada uno de los eventos



(a) Sin DPS.

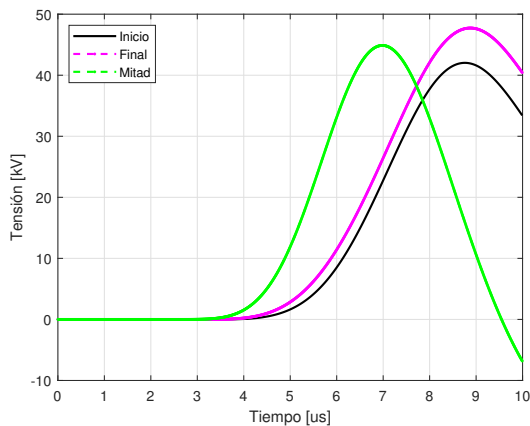


(b) DPS al inicio y final

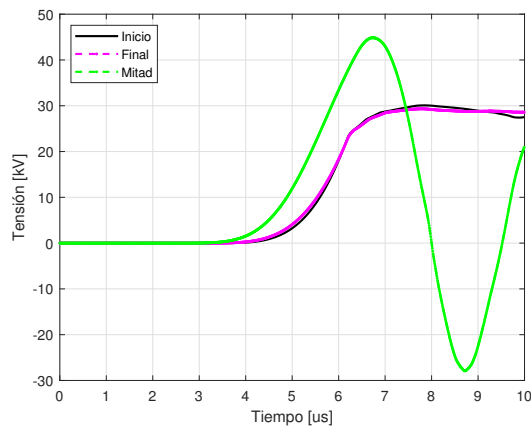


(c) DPS cada 500m

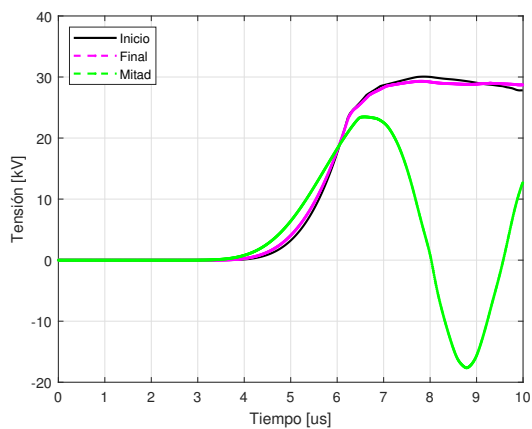
Figura 7. Evento 1.



(a) Sin DPS.

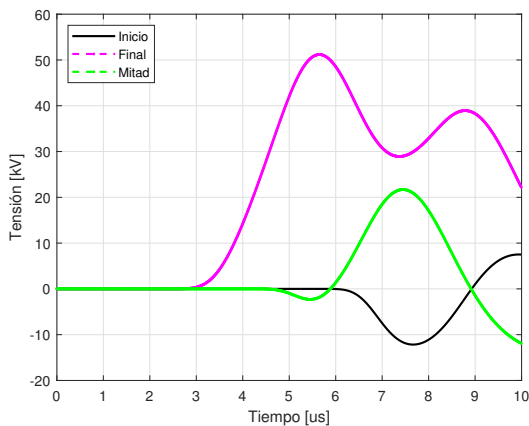


(b) DPS al inicio y final

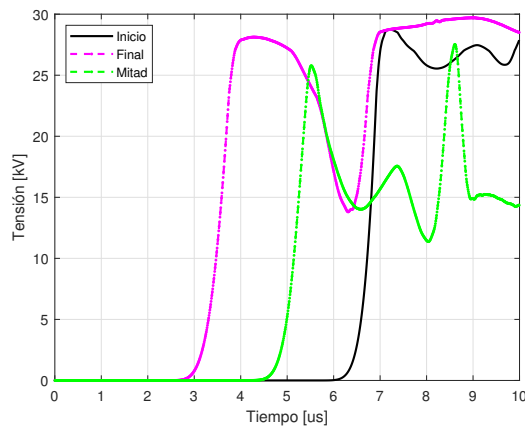


(c) DPS cada 500m

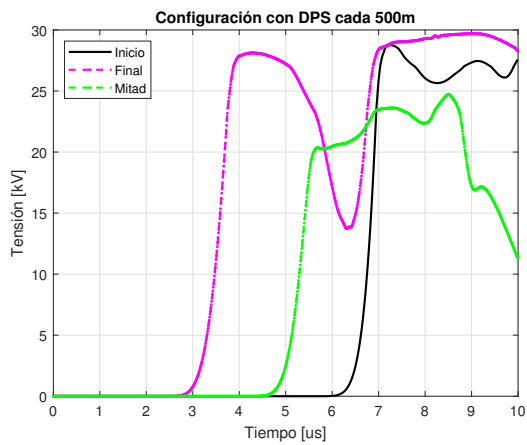
Figura 8. Evento 2.



(a) Sin DPS.

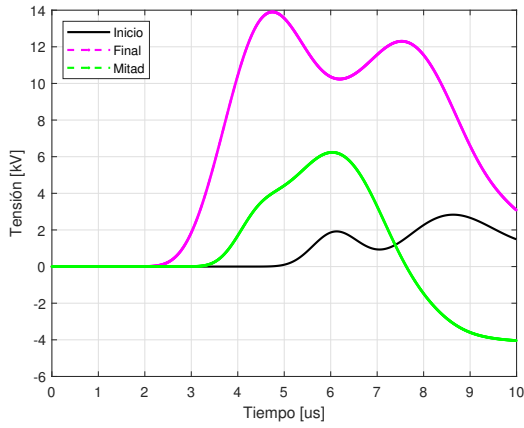


(b) DPS al inicio y final

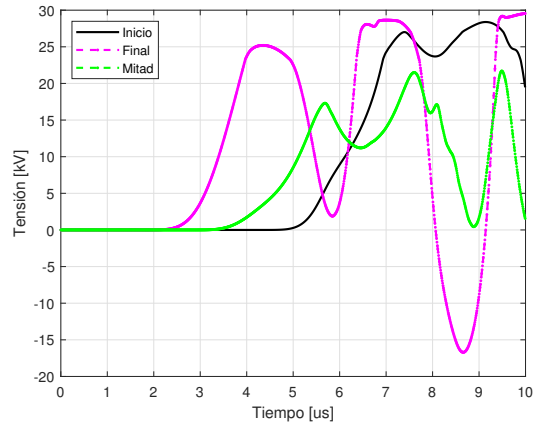


(c) DPS cada 500m

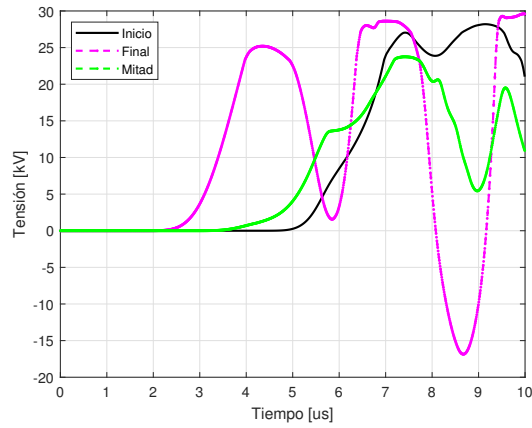
Figura 9. Evento 3.



(a) Sin DPS.



(b) DPS al inicio y final



(c) DPS cada 500m

Figura 10. Evento 4.

Apéndice B. Curva (V-I) del descargador

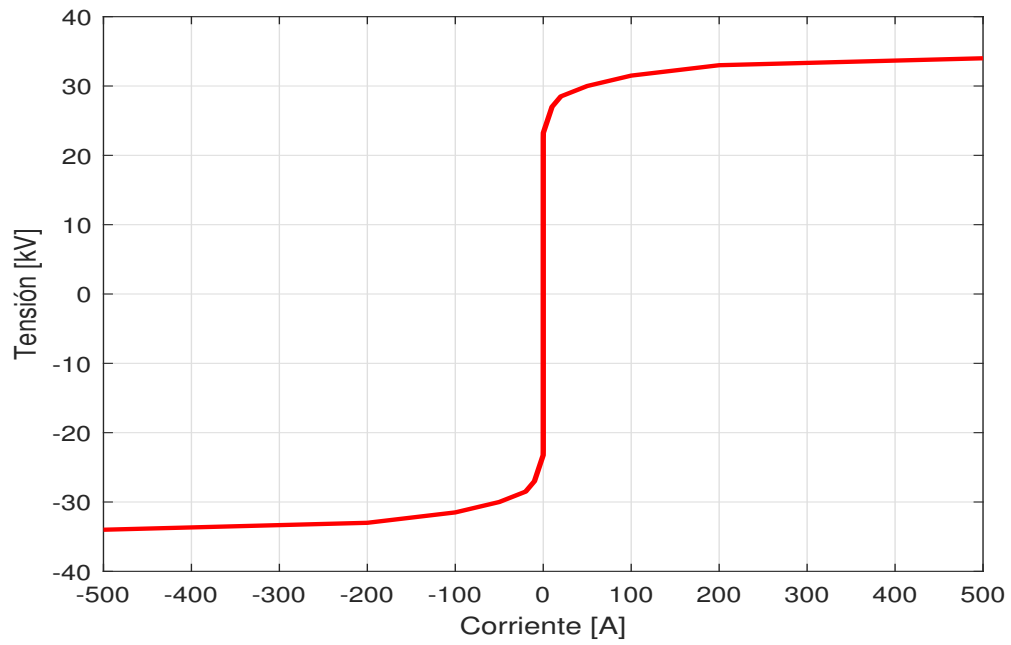


Figura 11. Curva característica V-I del descargador empleado.