

**CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE DESCARGADORES DE
SOBRETENSIÓN EN LAS TENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS SOBRE
LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN UBICADAS EN ZONA MONTAÑOSA**

**DANIEL ALBERTO MARTÍNEZ GONZÁLEZ
DIEGO FABIÁN VERDUGO NIÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

**CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE DESCARGADORES DE
SOBRETENSIÓN EN LAS TENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS SOBRE
LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN UBICADAS EN ZONA MONTAÑOSA**

**DANIEL ALBERTO MARTÍNEZ GONZÁLEZ
DIEGO FABIÁN VERDUGO NIÑO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

**Director:
EDISON ANDRÉS SOTO RIOS
Doctor en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres Nestor y Marleny por su apoyo incondicional en todo lo que hago y me propongo. ¡GRACIAS, LOS AMO!

Daniel Alberto Martínez G

A:

Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y por estar conmigo en cada paso que doy, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido de aporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mis padres por su apoyo en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

Mis hermanos, Nidia, Nairo, Diana, Yudy, Deivid, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho y a todos aquellos familiares que de una u otra forma aportaron su granito de arena.

Diego Fabián Verdugo Niño

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que ayudaron en la realización de este proyecto, en especial al Director de esta investigación, el profesor Edison Andrés Soto Ríos, por la orientación y supervisión de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.1 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LAS TENSIONES INDUCIDA.....	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	22
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 METODOLOGÍAS DEL CÁLCULO DE LA TENSIÓN INDUCIDA.....	23
3.2 FDTD 3D.....	25
3.2.1 Corriente de descarga de retorno.....	26
3.2.2 Calculo de los campos electromagnéticos.....	28
3.2.3 Modelos de acople.....	32
3.3 DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN (DPS).....	35
3.3.1 Representación del descargador de sobretensión (DPS) en el software FDTD3D.....	38
4. VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN USANDO EL MÉTODO FDTD 3D.....	41
4.1 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS SOFTWARES YALUK DRAW® Y FDTD 3D PARA TERRENO PLANO.....	44
4.1.1 Resultados caso 1.....	44

4.1.2 Resultados caso 2	48
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
5. TENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS EN ZONA DE MONTAÑA CONSIDERANDO EL EFECTO DE DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN EN LÍNEAS AÉREAS.....	51
5.1 RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SOFTWARE FDTD 3D PARA TERRENO NO PLANO	53
5.1.1 Resultado terreno A	54
5.1.2 Resultado terreno B	60
5.1.3 Resultado terreno C	67
5.1.4 Resultado terreno D	70
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
7. TRABAJOS FUTUROS.....	78
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tensión inducida producida por el rayo, adaptado del manual Yaluk Draw ®, 2010	20
Figura 2. Configuración de los campos eléctricos y magnéticos en el paralelepípedo, tomado de Thin Wire Representation in Finite Difference, 2002 ...	29
Figura 3. Clasificación de los modelos de acople más utilizados, adaptado de Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución, 2010	34
Figura 4. Diagrama de flujo del modelo apropiado del estudio de tensiones inducidas, adaptado de Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución, 2010	35
Figura 5. Componentes de un DPS óxido metálico, adaptado de Descargadores de sobretensión 3EE y limitadores de sobretensión 3EF, 2008	37
Figura 6. Funcionamiento de un DPS óxido metálico, adaptado de Descargadores de sobretensión 3EE y limitadores de sobretensión 3EF, 2008	38
Figura 7. Representación de las características de V-I de los DPS, tomado de Three-Dimensional FDTD Calculation of Lightning-Induced Voltages on a Multiphase Distribution Line With the Lightning Arresters and an Overhead Shielding Wire, 2014	39
Figura 8. Entorno de simulación para ambos softwares	42
Figura 9. Puntos específicos para representar las características de un descargador de sobretensión, adaptado de Akiyoshi Tatematsu y Taku Noda, inclusión surge arresters, 2014	43
Figura 10. Vista superior Y 3D de la descarga para caso 1 (terreno plano con descarga a 50 metros del inicio de la línea)	45

Figura 11. Tensión inducida sin DPS en el inicio y final de la línea para caso 1, (a) Yaluk Draw ®, (b) FDTD 3D	45
Figura 12. Tensión inducida al inicio y final de la línea para caso 1 cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea, (a) Yaluk Draw ®, (b) FDTD 3D	46
Figura 13. Tensión inducida al inicio y final de la línea para caso 1 cuando el DPS está ubicado al final de la línea, (a) Yaluk Draw ®, (b) FDTD 3D.....	47
Figura 14. Tensión inducida al inicio y final de la línea para caso 1 cuando el DPS está ubicado al inicio y final de la línea, (a) Yaluk Draw ®, (b) FDTD 3D	47
Figura 15. Vista superior Y 3D de la descarga para caso 2 (terreno plano con descarga en la mitad a 50 metros de la línea)	49
Figura 16. Curva característica (V-I) de un DPS, adaptado de Especificaciones técnicas para descargadores de sobretensión en media tensión, 2015	53
Figura 17. Vista 3D, superior y frontal del terreno A (terreno en forma de V)	54
Figura 18. Tensión inducida sin DPS en el inicio y final de la línea para terreno A55	
Figura 19. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea.....	56
Figura 20. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al final de la línea	57
Figura 21. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al inicio y al final de la línea.....	58
Figura 22. Vista 3D, superior y frontal del terreno B (terreno de montaña).....	61
Figura 23. Tensión inducida sin DPS en el inicio y final de la línea para terreno B62	
Figura 24. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno B cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea.....	63
Figura 25. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al final de la línea	64
Figura 26. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno B cuando el DPS está ubicado al inicio y al final de la línea.....	65
Figura 27. Vista 3D, superior y frontal del terreno C (terreno hueco).....	68
Figura 28. Vista 3D, superior y frontal del terreno D (terreno en forma de W)	71

Figura 29. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea.....	87
Figura 30. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno C cuando el DPS está ubicado al final de la línea	88
Figura 31. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno D cuando el DPS está ubicado al final de la línea	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados caso 1, terreno plano	48
Tabla 2. Resultados caso 2, terreno plano	49
Tabla 3. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) del terreno A	58
Tabla 4. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno A	60
Tabla 5. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno A	60
Tabla 6. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) del terreno B	65
Tabla 7. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno B	67
Tabla 8. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno B	67
Tabla 9. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) para terreno C.....	69
Tabla 10. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno C.....	70
Tabla 11. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno C	70
Tabla 12. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) del terreno D	72
Tabla 13. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno D	73

Tabla 14. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea)
del terreno D73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. RESULTADOS OBTENIDOS DE TENSIONES INDUCIDAS MAYORES A 100 kV	87

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN EN LAS TENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS SOBRE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN UBICADAS EN ZONA MONTAÑOSA*.

AUTORES: DANIEL ALBERTO MARTÍNEZ GONZALEZ, DIEGO FÁBIAN VERDUGO NIÑO*

PALABRAS CLAVES: Descargadores de sobretensión, rayo, tensión inducida, diferencias finitas (FDTD)

DESCRIPCIÓN:

Los parámetros de las descargas atmosféricas a nivel mundial se han caracterizado mediante mediciones realizadas por diferentes entidades especializadas en este tema en diferentes partes del mundo. En Colombia dichos parámetros se encuentran por encima de las medias registradas actualmente a nivel mundial, con una alta actividad de rayos explicada por la ubicación de Colombia en zona intertropical y otros factores ambientales que no se tienen en cuenta cuando se realizan los estudios pertinentes.

En Colombia existe una gran afectación de las redes de distribución debido al efecto de las descargas atmosféricas, especialmente debido a tensiones inducidas que superan el bajo nivel de aislamiento que poseen este tipo de redes. Se han realizado estudios relacionados con la influencia que tiene la topografía sobre la que se encuentran las redes de distribución en el campo electromagnético y las tensiones inducidas producidas por rayos en estas líneas.

El estudio de estos parámetros teniendo en cuenta la topografía donde se encuentran las redes de distribución, serán realizados mediante los métodos de diferencias finitas en el dominio del tiempo en tres dimensiones (FDTD 3D), incluyendo los efectos de los descargadores de sobretensión debido a las descargas directas o indirectas para seguir avanzando en términos de protección. Esto orientado a disminuir la tasa de fallas de las redes de distribución y mejorar la calidad de energía del sistema eléctrico.

* Trabajo de grado

* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Edison Andrés Soto Ríos

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE EFFECT OF SURGE ARRESTERS IN TENSIONS INDUCED BY LIGHTNING ON DISTRIBUTION LINES LOCATED IN MOUNTAIN AREA*.

AUTHORS: DANIEL ALBERTO MARTÍNEZ GONZALEZ, DIEGO FÁBIAN VERDUGO NIÑO**

KEYWORDS: Surge arresters, lightning, induced voltage, Finite Difference (FDTD)

DESCRIPTION:

The parameters of atmospheric discharges worldwide have been characterized by measurements made by different entities specialized in this subject in different parts of the world. In Colombia These parameters are above the averages currently registered worldwide, with high lightning activity explained by the location of Colombia in the intertropical zone and other environmental factors that do not take into account when carrying out the relevant studies.

In Colombia there is a great affectation of the distribution networks by the effect of the atmospheric discharges, especially by the induced tensions that surpass the low level of isolation that this type of networks have. Studies have been carried out related to the influence of the topography on the distribution networks in the electromagnetic field and the induced voltages produced by lightning in these lines.

The study of these parameters taking into account the topography where the distribution networks are, will be realized by the finite difference methods in the time domain in three dimensions (3D FDTD), including the effects of the surge arresters due to the Direct or indirect downloads to further advance in terms of protection. This is aimed at reducing the failure rate of distribution networks and improving the quality of energy of the electrical system.

* Research work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronic and Telecommunications. Director: Edison Andrés Soto Ríos

INTRODUCCIÓN

El suministro energético a nivel mundial se lleva a cabo por medio de las líneas de transmisión y distribución ya sean aéreas o subterráneas. Esta acción se ve truncada principalmente por la constante afectación que causa en estas redes el fenómeno de las descargas eléctricas atmosféricas, tanto por impactos directos como indirectos, ocasionando salidas de funcionamiento de las líneas y daños a los equipos conectados al sistema, lo que trae consigo la no continuidad del servicio de la energía eléctrica al usuario final.

Debido a los reiterados impactos indirectos en las líneas se dispuso el estudio, la investigación y la medición de este fenómeno para plantear que parámetros estaban asociados a él. Los primeros aportes fueron los realizados por Schonland [1] en 1934 sobre la corriente de la descarga de retorno y las investigaciones de Wagner y McCann [2] con las tensiones inducidas generadas por el canal del rayo. Gracias a los aportes subsecuentes, se desarrollaron modelos que describen el comportamiento de la descarga de retorno y el cálculo del campo electromagnético producido por ésta, para finalmente entender la interacción que existe entre el campo electromagnético producido por la descarga de retorno en las líneas de distribución aérea mediante las ecuaciones de Maxwell y aproximaciones de la línea de transmisión. [3][4][5][6][7]

Este proyecto pretende ahondar en el tema de las tensiones inducidas generadas por rayos, incluyendo el efecto de la topografía en redes aéreas. Siguiendo la línea investigativa en [8]; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El trabajo se soporta en los software de simulación Yaluk Draw® [9] y métodos de diferencias finitas en el dominio del tiempo en tres dimensiones (FDTD 3D) [8]. En este último se simularán configuraciones de terrenos no planos para encontrar el efecto que

tienen los descargadores de sobretensión en las tensiones inducidas por rayos sobre redes aéreas y con estos resultados obtener conclusiones, orientadas a disminuir la tasa de fallas de las redes de distribución ante impactos indirectos.

Este documento está dividido en 5 capítulos. En el capítulo 1 se encuentra una revisión bibliográfica básica que tiene como objetivo dar a conocer los aspectos relevantes de la tensión inducida y los métodos con los que se estudian estos fenómenos. El capítulo 2 muestra la validación del software FDTD 3D mediante la comparación de los resultados en diferentes escenarios con la ayuda del software Yaluk Draw ®. El capítulo 3 presenta los resultados de tensiones inducidas teniendo en cuenta el comportamiento del descargador bajo las condiciones de zona montañosa. El capítulo 4 presenta las conclusiones obtenidas de los análisis del capítulo anterior y el último capítulo propone los trabajos futuros que se pueden realizar en base a este trabajo.

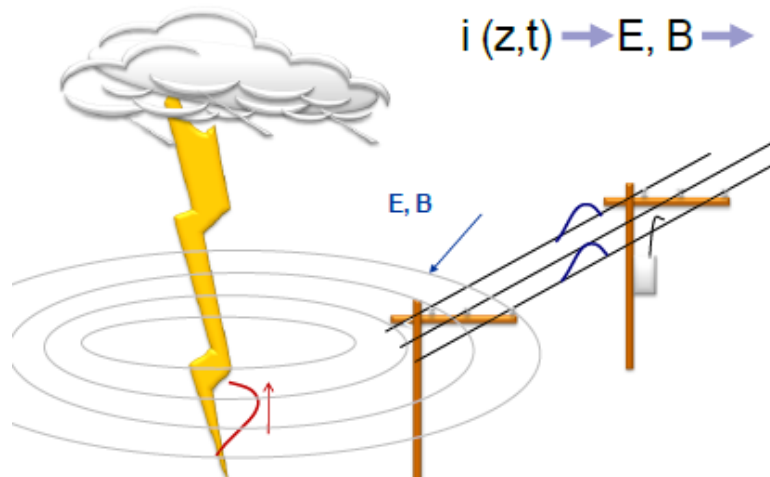
1. JUSTIFICACIÓN

1.1 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LAS TENSIONES INDUCIDA

Uno de los causantes del mayor número de fallas en los sistemas eléctricos en Colombia ha sido el rayo. Así lo demuestra un estudio realizado para la CREG [10], en el que se determinó que al menos el 70% de las perturbaciones en los sistemas eléctricos se deben a las descargas atmosféricas. De las cuales, las descargas que se presentan con mayor frecuencia son las indirectas [8] generando un alto número de tensiones inducidas en la líneas de distribución.

La tensión inducida se presenta por el acople entre el campo electromagnético producido por el rayo y la línea de distribución. Esta se convierte en una onda viajera, que al llegar a la cadena de aisladores de la línea causa flameo y como consecuencia provoca la salida de operación de la red (como se puede apreciar en la figura 1). Convirtiendo las tensiones inducidas, en un punto importante a analizar.

Figura 1. Tensión inducida producida por el rayo, adaptado del manual Yaluk Draw ®, 2010



Actualmente gracias a los diferentes estudios desarrollados desde principios de 1908 por Warner [11] y diferentes autores, se han propuesto y complementado metodologías para modelar las tensiones inducidas y tomar acciones pertinentes en los sistemas de aislamiento disminuyendo las fallas de la red [11].

Existen algunos estándares como la IEEE 1410 (Guía para el mejoramiento del desempeño ante rayos de líneas aéreas de distribución eléctrica) [12] donde se hacen importantes recomendaciones que pueden ser de ayuda para mitigar los efectos del rayo.

Sin embargo existe un inconveniente, no se consideran los factores orográficos de los países que se encuentran en zonas intertropicales (donde las líneas de distribución se ubican sobre zonas montañosas), como es el caso de Colombia. Esto conlleva a indagar nuevos valores de tensión inducida y por consiguiente como es el comportamiento de los elementos de protección (DPS), debido a que se verán afectados por parámetros mayores a los cuales están diseñados.

En base a esta problemática, se plantean los objetivos de este trabajo para seguir avanzando en el campo de las tensiones inducidas y cómo afectan a los elementos de protección de la línea cuando se encuentra ubicadas en zona montañosa.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto es analizar el efecto de descargadores de sobretensión en las tensiones inducidas por rayos sobre líneas de distribución ubicadas en zona montañosa.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

En cumplimiento al objetivo general, el trabajo de grado posee los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica de cálculo de tensiones inducidas por rayos en líneas de distribución aéreas.
- Verificar el efecto de los descargadores de sobretensión en líneas aéreas ubicadas sobre terrenos planos.
- Calcular tensiones inducidas por rayos en zona de montaña considerando el efecto de descargadores de sobretensión en líneas aéreas.
- Concluir sobre el efecto de los descargadores de sobretensión en redes de distribución ubicadas sobre zonas montañosa.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se pretenden mostrar los conceptos más representativos para un mayor entendimiento del trabajo y llevar a cabo la realización del primer objetivo específico, mostrando la metodología implementada por el software FDTD 3D para el cálculo de las tensiones inducidas en terreno plano y no plano, así como la inclusión del descargador de sobretensión en estos escenarios.

3.1 METODOLOGÍAS DEL CÁLCULO DE LA TENSIÓN INDUCIDA.

Un rayo genera un campo electromagnético que puede inducir sobretensiones de magnitudes significativas en las líneas de distribución que se encuentren alrededor, generando fallas o salida de funcionamiento de las mismas, la fase de la descarga de retorno del rayo se considera la principal responsable de las tensiones inducidas debido a las corrientes tan elevadas que se presentan. Por lo general la distancia a la cual una descarga atmosférica alcanza a generar daños en la línea es 200 m [8][13].

Debido a la salida de funcionamiento, y a la poca información acerca del comportamiento de las líneas a causa de las tensiones inducidas generadas por rayos, se han llevado a cabo varios estudios y se desarrollaron modelos de acople para estimar de manera adecuada este fenómeno, el aporte de Rusck fue uno de los primeros [14] (ecuación 1).

$$V_o = \frac{Z_0 I_o h}{y} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2 * c^2 - v^2}} \right) \quad [kV] \quad (1)$$

Donde:

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 30 \Omega$$

h : *Altura de la línea* [m]

I_0 : *Amplitud máxima de la corriente de la descarga de retorno* [kA]

y : *Distancia desde la línea al punto de impacto del rayo* [m]

v : *Velocidad de la descarga retorno* [m/ μ s]

c : *Velocidad de la luz* = 300 [m/ μ s]

Existen otros modelos de acople propuestos por: Agrawal, Price y Gurbaxani [3], Taylor, Sctterwhite y Harrison [4], Rachidi [5] y Chowdhuri [6]. Siendo el modelo de Agrawal et al. el más utilizado por la literatura a nivel mundial puesto que esta validado con éxito experimentalmente, este se expresa en función de la tensión dispersa y como única fuente de inducción la componente de campo eléctrico horizontal. (ver sección 1.6).

Luego aparece Nucci [7], planteando una metodología para calcular tensiones inducidas, descritas en tres pasos:

1. En primer lugar, se adopta un modelo de la descarga de retorno que especifica la distribución espacio temporal de la corriente del rayo a lo largo del canal.
2. En segundo lugar, se calcula el campo electromagnético producido por una distribución de la corriente de descarga retorno.
3. Finalmente se calculan las tensiones inducidas en la línea a partir de un modelo de acoplamiento.

Debido a la dificultad para calcular los campos electromagnéticos se hace fundamental el uso de algoritmos dedicados a tal fin, como lo son las ecuaciones de Sommerfeld [15], y las ecuaciones simplificadas de Master y Uman[8]. Al igual, se

han utilizado metodologías numéricas como lo son: las diferencias finitas (FDTD)[16] [17], los momentos (MoM) [18] [19] y los elementos finitos (FEM) [20] [21].

Soto desarrolla con la herramienta matemática Matlab [22] el software FDTD 3D implementando la metodología numérica de las diferencias finitas (FDTD) y el conductor delgado [8][23] para calcular las tensiones inducidas tanto en terreno plano como no plano.

Con la ayuda del director de este trabajo, se incluyen los descargadores de sobretensión en el software mediante las técnicas de incorporación de dispositivos no lineales [24] para validar su funcionamiento en terreno plano y observar su comportamiento cuando se incluyen en terrenos no planos. A continuación, se describe cómo funciona el software y como se modelan los parámetros y elementos para el cálculo de las tensiones inducidas en él.

3.2 FDTD 3D

El software FDTD 3D es una herramienta que permite resolver fenómenos de sobretensión en tres dimensiones como un problema de campo eléctrico y magnético, ya que utiliza el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo, partiendo del ingreso de unos parámetros de entrada tales como:

- La magnitud de la corriente de descarga de retorno
- Parámetros de la línea (radio, longitud, altura y magnitud de impedancias conectadas al inicio y final de la línea).
- La topografía.
- El volumen de trabajo.
- Los valores de la curva característica (V-I) de los DPS que se pueden adquirir con la hoja de datos de los fabricantes.

- Permite el ajuste de la posición del rayo, la línea y el DPS.

La selección de los parámetros de simulación que se utilizaron en este trabajo de explicaran más adelante en el capítulo 2.

Cabe aclarar que el software fue facilitado por el director de este trabajo de grado para cumplir los objetivos del proyecto.

3.2.1 Corriente de descarga de retorno Esta es la etapa donde el rayo tiene mayor energía y por consiguiente genera más calor, luz y ruido. La magnitud de la corriente de descarga de retorno es el parámetro más importante ya que puede variar de acuerdo con el lugar geográfico donde impacte.

Existen varios modelos utilizados para describir la corriente de descarga de retorno a lo largo del canal del rayo y se clasifican en: ingeniería, dinámica de gases, parámetros distribuidos y electromagnéticos los cuales se describen y se compilan en los trabajos realizados por Rakov, Uman, Golde y Cooray [25][11].

Los modelos de corriente de descarga de retorno que se utilizan en el software implementado en esta tesis son:

- El modelo de línea de transmisión (TL)
- El modelo modificado de línea de transmisión (MTL),

Estos hacen parte del grupo de ingeniería, debido a que presentan menores errores absolutos a la hora de estudiar tensiones inducidas.[11]

El modelo TL (ecuación 2) supone que la corriente en la base del canal asciende por este como si estuviera en una línea de transmisión sin pérdidas a una velocidad v .

$$i(z', t) = i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)$$

$$i(z', t) = 0$$
(2)

Para $z' \leq v * t$

Donde:

v : Velocidad de la descarga de retorno.

Al modelo MTL se le hace una modificación, donde la magnitud de la corriente disminuye a medida que se propaga por el canal para considerar el efecto de la distribución vertical de la carga producida por la corona del líder; esta disminución se ha planteado que puede ser lineal (MTLL) o exponencial (MTLE). En la actualidad el modelo más usado para este fin es el MTLE [11][7] (ecuación 3).

$$i(z', t) = e^{-\left(\frac{z'}{\lambda}\right)} * i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)$$

$$i(z', t) = 0$$
(3)

Para $z' > v * t$

Donde:

v : Velocidad de la descarga de retorno.

λ : es la constante de decaimiento

La expresión matemática más utilizada para representar la corriente en la base del canal, es la propuesta por Heidler[15] (ecuación 4), en la cual su amplitud, tiempo de frente y de cola son aproximados y colocados directamente en la ecuación, adicionalmente tiene la propiedad de tener su derivada en $t=0$, representando de una mejor manera la corriente real medida.

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} * e^{\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (4)$$

Donde:

η : Factor de corrección de la amplitud

I_0 : Amplitud de la corriente en la base del canal

τ_1 : Constante del tiempo de frente

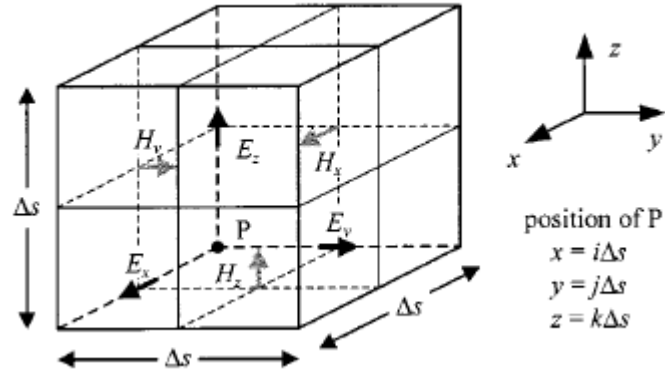
τ_2 : Constante del tiempo de cola

n : factor de corrección, su valor oscila entre 2 y 10

3.2.2 Calculo de los campos electromagnéticos Para el cálculo de los campos electromagnéticos se discretiza un paralelepípedo en todas las direcciones con paso espacial Δs quedando como resultado todo el espacio lleno de cubos, cuyos lados son Δs y cada cubo de una celda como se observa en la figura 6 [23].

El campo eléctrico y magnético se deben situar en los bordes y caras de los paralelepípedos rectangulares para ser discretizados (figura 6). El tamaño de estos cubos debe ser más pequeño que la longitud de onda para lograr mejor precisión en los resultados y el paso del tiempo se determina en función de la condición de Courant (ecuación 14) (figura 6) [23].

Figura 2. Configuración de los campos eléctricos y magnéticos en el paralelepípedo, tomado de Thin Wire Representation in Finite Difference,2002



Para la discretización de los campos eléctricos y magnéticos se parte de las ecuaciones de Maxwell que son (ecuación 5 y 6):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{H} = -\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (6)$$

Donde

E Campo eléctrico

H Campo magnético

ρ Densidad de carga

ε Permitividad

μ Permeabilidad

σ Conductividad

Las componentes de las ecuaciones discretizadas de campo eléctrico y campo magnético son:

$$\begin{aligned}
E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) &= K_1 E_x^{n-1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \\
&+ K_2 \left\{ H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right) \right. \\
&\left. - H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) \right\}
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) &= K_1 E_y^{n-1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \\
&+ K_2 \left\{ H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right) \right. \\
&\left. - H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) \right\}
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) &= K_1 E_z^{n-1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \\
&+ K_2 \left\{ H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) \right. \\
&\left. - H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \right\}
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) &= H_x^{n-1/2} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \\
&+ K_3 \left\{ -E_z^n \left(i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) \right. \\
&\left. + E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \right\}
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) &= H_y^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\
&+ K_3 \left\{ -E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1 \right) + E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right. \\
&\left. + E_z^n \left(i + 1, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
H_z^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) &= H_z^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \\
&+ K_3 \left\{ -E_y^n \left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k \right) + E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \right. \\
&\left. + E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \right\}
\end{aligned} \tag{12}$$

Donde

$$K_1 = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}$$

$$K_2 = \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta s} \frac{1}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \quad (13)$$

$$K_3 = \frac{\Delta t}{\mu \Delta s}$$

Para que sea estable el cálculo de los campos eléctricos y magnéticos se debe satisfacer la condición de Courant (ecuación 14):

$$\frac{\Delta t}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

3.2.3 Modelos de acople Los modelos de acoplamiento son los que evalúan la tensión inducida debida al acoplamiento entre el campo electromagnético de la descarga y la línea aérea. Rusck fue uno de los primeros en introducir un modelo de acople basado en la aproximación de línea de transmisión para describir el efecto de la inducción en la línea, producida por el rayo principalmente por la descarga de retorno en el año de 1957 (ecuación 1)[14]. Puesto que su modelo presenta características de simplicidad y exactitud.

Con el tiempo se fueron desarrollando modelos de acople, entre los más conocidos están los de: Agrawal, Prince y Gurbaxani (1980), Taylor, Scatterwhite y Harvison (1965), Rachidi (1993) y Chowdhuri (1969). En la figura 3 se muestra una clasificación de los modelos de acople más utilizados.[14] [26]

El modelo de Agrawal, Prince y Gurbaxani se expresa en función de la tensión dispersa y corriente inducida total y considera como única fuente de inducción en la línea de distribución la componente de campo eléctrico horizontal. Este modelo actualmente es el más utilizado debido a su gran exactitud en los resultados, ventaja al momento de evaluar tensiones inducidas en líneas aéreas ramificadas e incluso en la utilización de diferentes modelos del canal de descarga atmosférica para terreno plano e inclinado. Este modelo se expresa por medio de dos ecuaciones de línea de transmisión como se muestra a continuación [14][26] (ecuación 6 y 7).

$$\frac{d[V^3(x)]}{dx} + Z'[I(x)] = [E_x(x, h)] \quad (6)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + Y'V^3(x) = 0 \quad (7)$$

Donde:

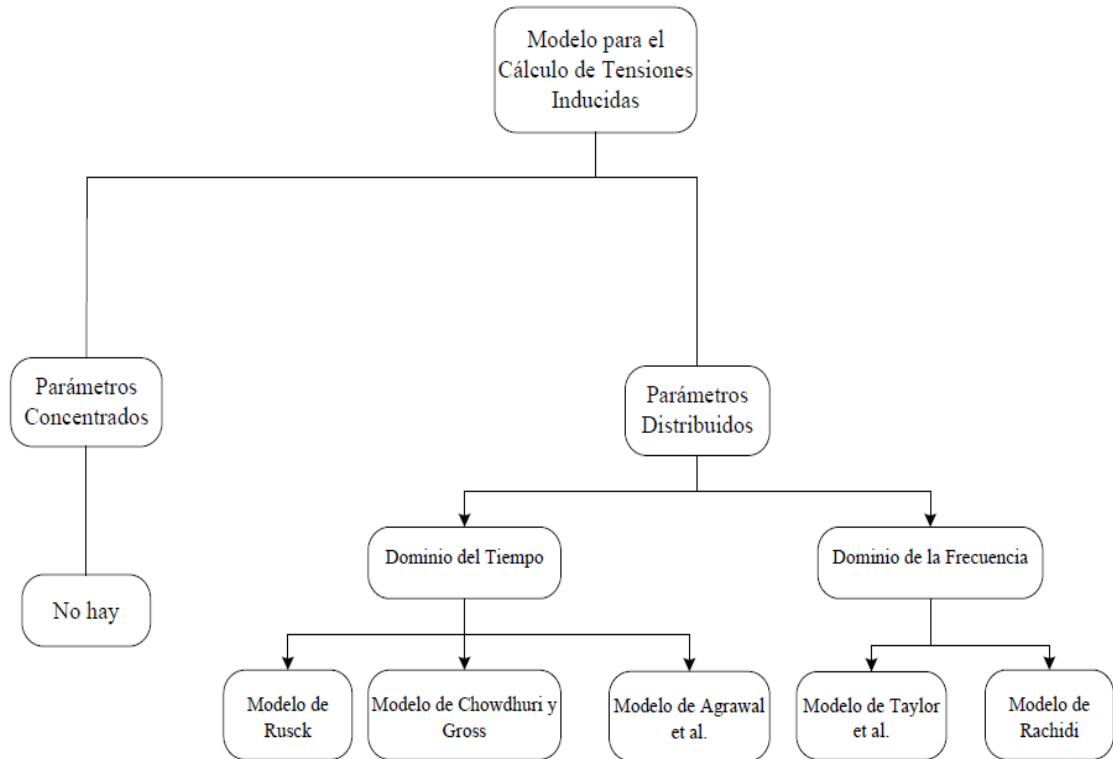
V^3 : es la tensión dispersa

I : es la corriente de línea

Z' : es la impedancia de la línea

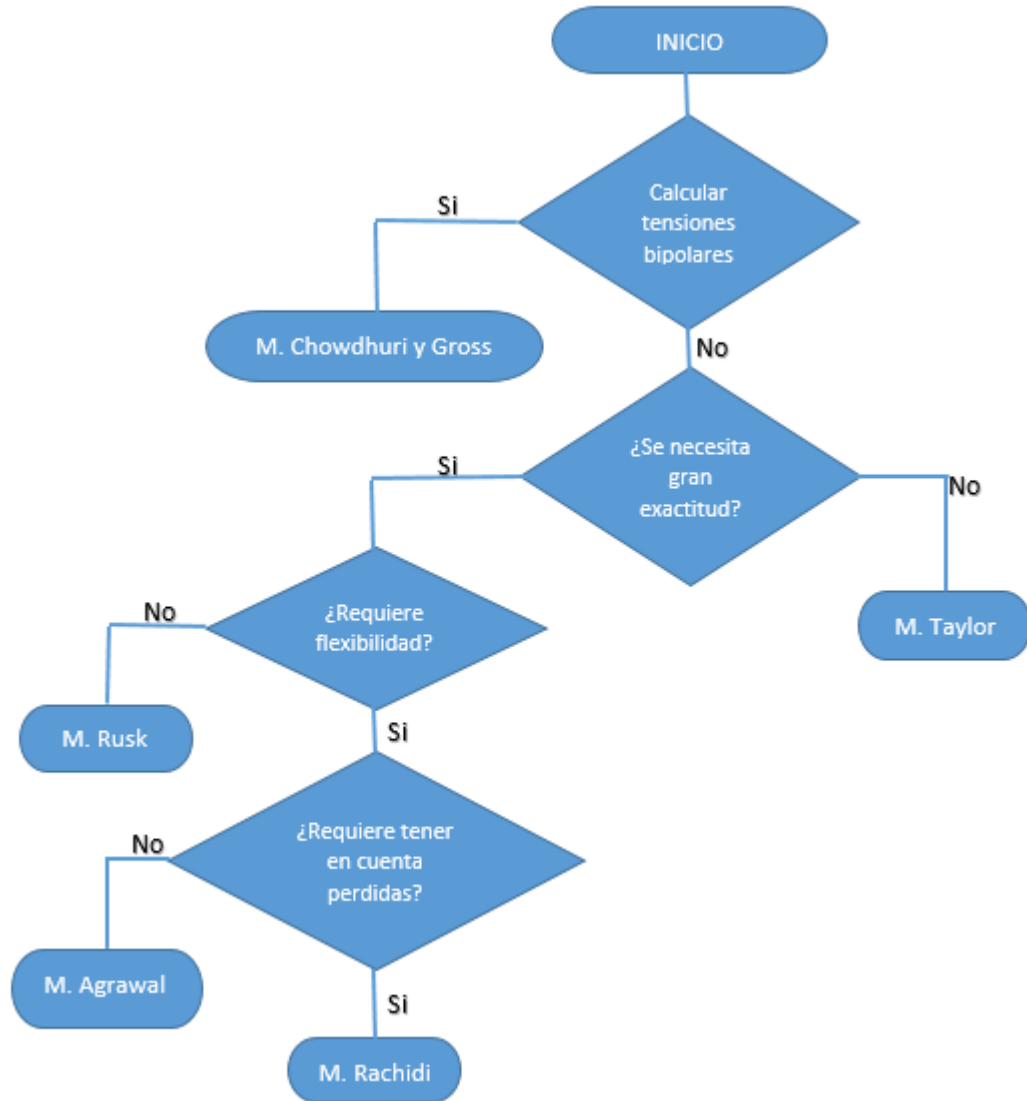
Y' : es la admitancia de la línea

Figura 3. Clasificación de los modelos de acople más utilizados, adaptado de Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución, 2010



El cálculo de las tensiones inducidas por descargas atmosféricas dependerá del modelo de acople que se utilice y cada uno es independiente del modelo de descarga; A continuación, se mostrará un diagrama de flujo que ayudara a la selección de un modelo de acople de acuerdo a la necesidad en cuestión[26] (ver figura 4).

Figura 4. Diagrama de flujo del modelo apropiado del estudio de tensiones inducidas, adaptado de Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución, 2010



3.3 DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN (DPS)

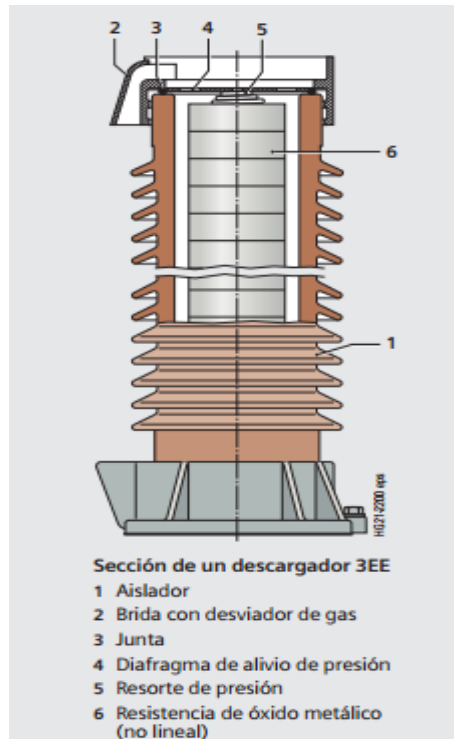
Los descargadores de sobretensión (DPS) son dispositivos diseñados para proteger los elementos y dispositivos eléctricos de un sistema de distribución, generación y

transformación contra las sobretensiones, limitando su duración y su amplitud. Estas sobretensiones son originadas por descargas atmosféricas, de maniobra, etc y son llevadas a tierra por medio de bajantes o la estructura como tal.

Con base en la bibliografía consultada y los manuales revisados [27][28], se describen los elementos presentes y como se encuentran distribuidos en un DPS óxido metálico. Los cuales se pueden apreciar más adelante en la figura 5.

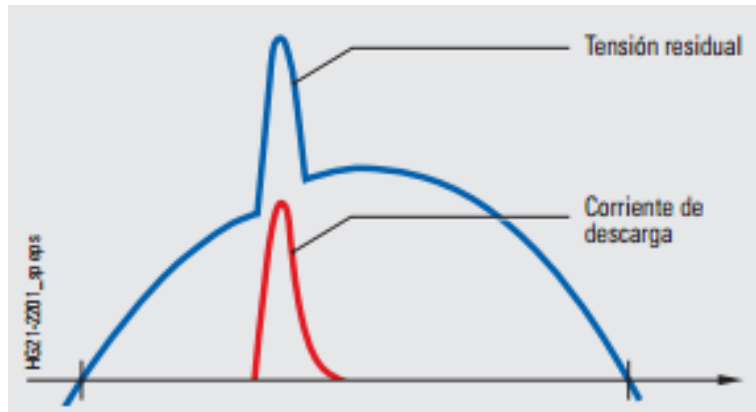
Las resistencias de óxido metálico (6) están apiladas dentro de una envolvente de porcelana (1) herméticamente cerrada. Las bridas con desviadores de gases integrados (2) son de una aleación de metal ligero resistente a la intemperie y están masilladas con la envolvente de porcelana. El Sistema de protección para evitar el paso del agua al interior del DPS se obtiene mediante juntas (3) resistentes a la intemperie y al ozono, así como mediante diafragmas metálicos anticorrosivos (4). Cada componente va equipado con dispositivos de alivio de presión y desviadores de gas a ambos extremos.

Figura 5. Componentes de un DPS oxido metálico, adaptado de Descargadores de sobretensión 3EE y limitadores de sobretensión 3EF, 2008



El DPS al estar diseñado con resistencias no lineales, limita a que con cierto valor de tensión sólo fluye una mínima corriente de fuga. Al producirse sobretensiones tipo rayo o de maniobra, las características de las resistencias cambian, haciendo que disminuya su valor de tal forma que drene a tierra la corriente, reduciendo la sobretensión al valor de tensión al cual está diseñado el DPS como se muestra en la figura 6. Cuando ocurre la descarga, las corrientes generadas pueden alcanzar hasta 1 kA para sobretensiones de maniobra y de 1 kA a 20 kA para sobretensiones tipo rayo.

Figura 6. Funcionamiento de un DPS oxido metálico, adaptado de Descargadores de sobretensión 3EE y limitadores de sobretensión 3EF, 2008



3.3.1 Representación del descargador de sobretensión (DPS) en el software FDTD3D. Para lograr la representación de los DPS se utiliza un algoritmo de salto el cual deriva las ecuaciones de campo eléctrico y magnético[24] (ecuaciones 18 y 19) [24].

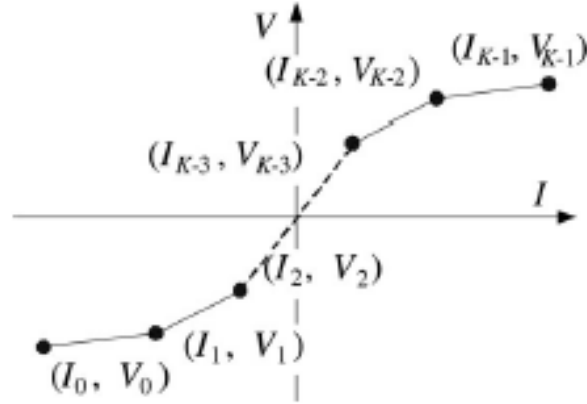
$$E^{n+1} = E^n + \frac{\Delta t}{\epsilon} \nabla_x H^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta S^2} I^{n+1/2} \quad (18)$$

$$H^{n+3/2} = H^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla_x E^{n+1} \quad (19)$$

Para representar el DPS en el software FDTD 3D se hace mediante las técnicas de incorporación de dispositivos no lineales (diodo). Las características del dispositivo se modelan mediante su curva característica (V-I) que se pueden encontrar en las hojas de datos de fabricantes.

El software representa la curva característica mediante una serie de puntos como se muestra en la figura 7 pero deben cumplir las condiciones $V_k < V_{k+1}$ e $I_k < I_{k+1}$.

Figura 7. Representación de las características de V-I de los DPS, tomado de Three-Dimensional FDTD Calculation of Lightning-Induced Voltages on a Multiphase Distribution Line With the Lightning Arresters and an Overhead Shielding Wire, 2014



Los valores (I_0, V_0) y (I_1, V_1) , y (I_{K-2}, V_{K-2}) Y (I_{K-1}, V_{K-1}) se obtienen mediante unas extrapolaciones lineales [24].

Las características V-I de la resistencia no lineal se dan por las siguientes ecuaciones:

1. En caso de $V^{n+1/2} < V_1$

$$V^{n+1/2} = R_0(I^{n+1/2} - I_0) + V_0 \quad (20)$$

2. En caso de $V_k \leq V^{n+1/2} < V_{k+1} (1 \leq k \leq K-3)$

$$V^{n+1/2} = R_k(I^{n+1/2} - I_k) + V_k \quad (21)$$

3. En caso de $V_{k-2} \leq V^{n+1/2}$

$$V^{n+1/2} = R_{k-2}(I^{n+1/2} - I_{k-2}) + V_{k-2} \quad (22)$$

Donde $R_k = \frac{V_{k+1}-V_k}{I_{k+1}-I_k}$

A partir de la ecuación 22 se obtiene

$$I^{n+1/2} = \frac{V^{n+1/2}}{R_k} - \left(\frac{V_k}{R_k} - I_k \right) \quad (23)$$

Y reemplazando la relación $V^{n+1/2} = \left(\frac{E_{n+1}+E_n}{2} \right) \Delta s$ en la ecuación 23 se obtiene

$$I^{n+1/2} = \frac{(E^{n+1} + E^n) \Delta s}{2R_k} - \left(\frac{V_k}{R_k} - I_k \right) \quad (24)$$

Y sustituyendo (24) en (18) se obtiene la ecuación para actualizar el campo eléctrico situado alrededor del dispositivo no lineal.

$$E^{n+1} = \frac{1 - C}{1 + C} E^n + \frac{\Delta t}{(1 + C)\epsilon} (\nabla \times H) \quad (25)$$

Donde

$$C = \frac{\Delta t}{2 * R_k * \epsilon * \Delta s}$$

4. VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN USANDO EL MÉTODO FDTD 3D

Para el análisis del fenómeno de la tensión inducida es indispensable el uso de softwares, los cuales facilitan la obtención de unos parámetros teniendo en cuenta los posibles factores que afectan a la línea. Estos simuladores condensan los métodos de cálculo de las tensiones inducidas en las líneas por descargas atmosféricas de tal manera que la interfaz con el usuario sea más amigable.

El simulador Yaluk Draw ® [9] utiliza el modelo de acople de Agrawal (ecuaciones 7 y 8) debido a que tiene buena exactitud, evalúa las tensiones inducidas solo tomando el campo eléctrico en líneas ramificadas e incluso para canales de descarga inclinados pero solo si el campo electromagnético se obtuvo teniendo en cuenta la inclinación [26]; pero los cálculos mediante este software solo pueden ser aplicables en líneas de distribución que se encuentran en zonas planas.

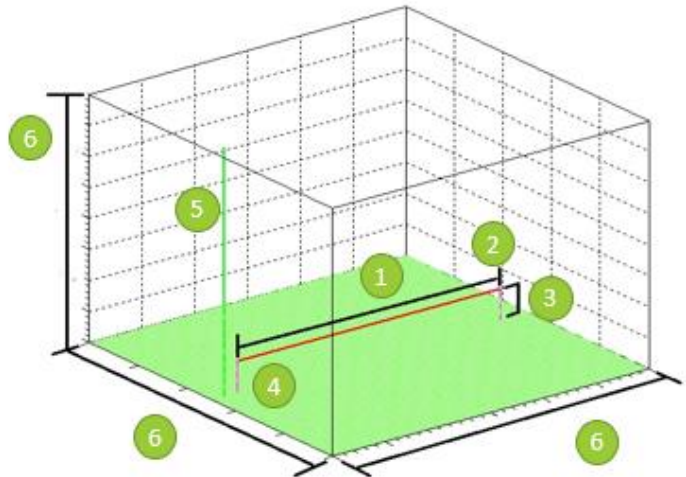
Muy recientemente se han empezado a utilizar métodos en diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) que incluyen la topografía y el efecto de los descargadores. En este capítulo se verificará que el funcionamiento del software FDTD 3D sea el adecuado, contrastando sus resultados con el software tradicional Yaluk Draw ®, por medio de diferentes configuraciones, variando el punto de impacto y la posición del descargador, con el fin de obtener una precisión en los resultados futuros cuando se incluyan configuraciones de terreno no plano, para llevar a cabo la realización del segundo objetivo específico del trabajo.

El entorno diseñado para la simulación en ambos softwares se realizó con los parámetros que se aprecian en la figura 8, cabe resaltar que los parámetros

seleccionados son valores típicos que se han usado en la literatura para realizar diferentes investigaciones [8].

Figura 8. Entorno de simulación para ambos softwares

1. Una línea de 1000 m.
2. 5 mm de radio.
3. Una altura de 10 m.
4. Una resistencia de 500 Ω , ubicadas a los extremos de la línea.
5. Un canal de descarga de retorno típica de $I_p = 12 \text{ kA}$ y $di/d_t = 40 \text{ kA}/\mu\text{s}$.
6. El software FDTD 3D emplea un volumen de trabajo de 1200x500x980 m.



Para llevar a cabo la validación de los descargadores de sobretensión usando el método FDTD 3D; inicialmente se proponen dos casos de simulación en los cuales para cada uno se varia la posición de la descarga sin tener en cuenta los DPS para verificar si los resultados de las tensiones inducidas son similares con el software Yaluk Draw ®.

Luego de obtener las tensiones inducidas y verificar que los resultados sean correctos, se procede a incluir los descargadores de sobretensión de 34,5 [kV] en ambos softwares tomando los valores del artículo de Akiyoshi Tatematsu y Taku Noda [24], presentados en la figura 9, ubicandolos en diferentes posiciones a lo largo de la línea con el fin de observar si el funcionamiento del DPS en el FDTD 3D es el adecuado contrastando con los resultados del Yaluk Draw ®.

Los casos de simulación utilizados para el terreno plano en este trabajo son:

- Caso 1: terreno plano con descarga a 50 m del inicio de la línea (Figura 10)

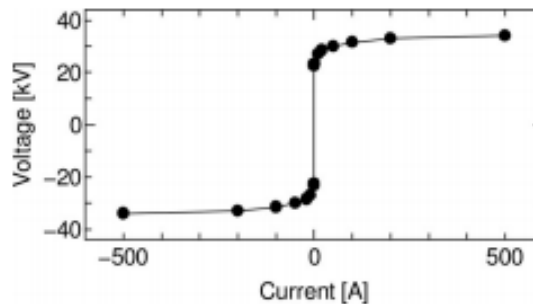
- Caso 2: terreno plano con descarga en la mitad a 50 m de la línea (Figura 15)

Las diferentes posiciones utilizadas de los DPS son:

- DPS al inicio de la línea
- DPS al final de la línea
- DPS al inicio y final de la línea

k	I_k [A]	V_k [V]	k	I_k [A]	V_k [V]
0	-500	-34000	8	0.001	22500
1	-200	-33000	9	0.1	23250
2	-100	-31500	10	10	27000
3	-50	-30000	11	20	28500
4	-20	-28500	12	50	30000
5	-10	-27000	13	100	31500
6	-0.1	-23250	14	200	33000
7	-0.001	-22500	15	500	34000

Figura 9. Puntos específicos para representar las características de un descargador de sobretensión, adaptado de Akiyoshi Tatematsu y Taku Noda, inclusión surge arresters, 2014.



4.1 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS SOFTWARES YALUK DRAW ® Y FDTD 3D PARA TERRENO PLANO

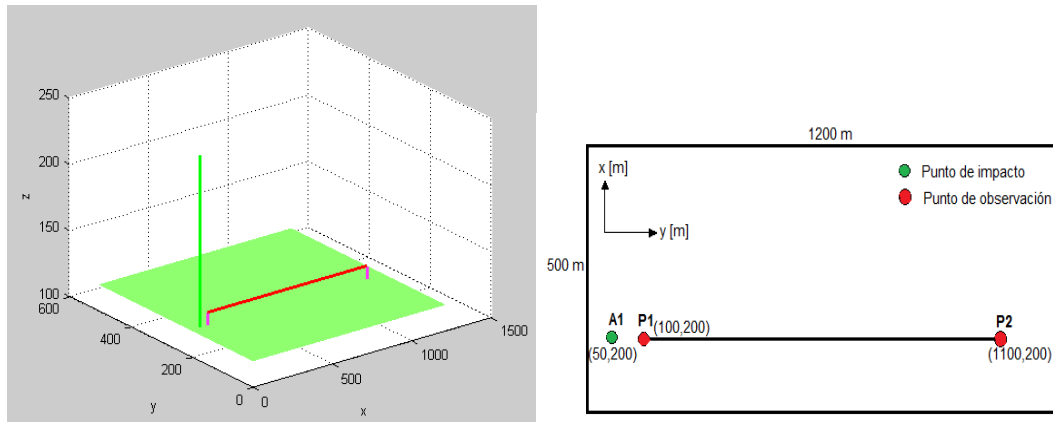
La simulación de los escenarios planteados en terreno plano con el software FDTD 3D, se realiza particularmente para verificar el funcionamiento de los descargadores de sobretensión y validar los datos calculados a partir del software Yaluk Draw ®; para luego seguir con las simulaciones en escenarios de terreno no plano como se mostrará en el capítulo siguiente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las tensiones inducidas para cada caso y cómo cada arreglo de los descargadores de sobretensión afecta dicha tensión.

4.1.1 Resultados caso 1 En esta sección se plantea el caso 1; el cual consiste en que la posición de la descarga se encuentra a 50 m del inicio de la línea (punto A1) como se puede apreciar en la figura 10.

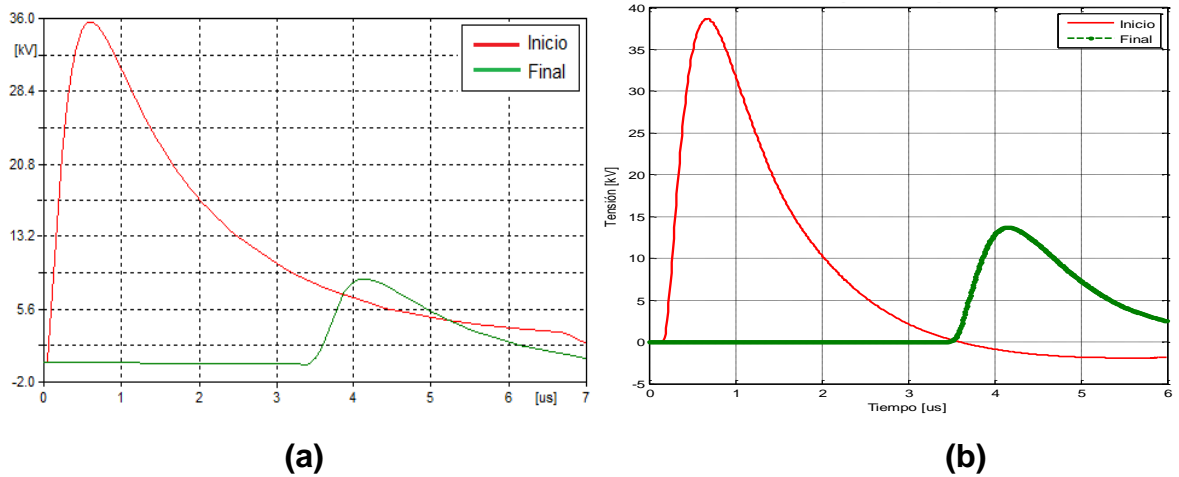
Primero se mostrarán los resultados sin tener en cuenta el efecto del DPS (figura 11) y se verifica si los datos obtenidos son similares, seguido se exponen los valores de tensión teniendo en cuenta el descargador en cada una de sus posiciones (figura 12,13,14) y se repite el proceso anterior de comparar datos para validar por completo el funcionamiento del descargador de sobretensión y del software FDTD 3D; todos los resultados serán vistos desde los puntos de observación (P1 y P2, inicio y final de la línea respectivamente como se puede apreciar en la figura 10).

Figura 10. Vista superior Y 3D de la descarga para caso 1 (terreno plano con descarga a 50 metros del inicio de la línea)



La figura 11 muestra el resultado de la tensión inducida que se presenta al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2, figura 10), sin la inclusión del DPS.

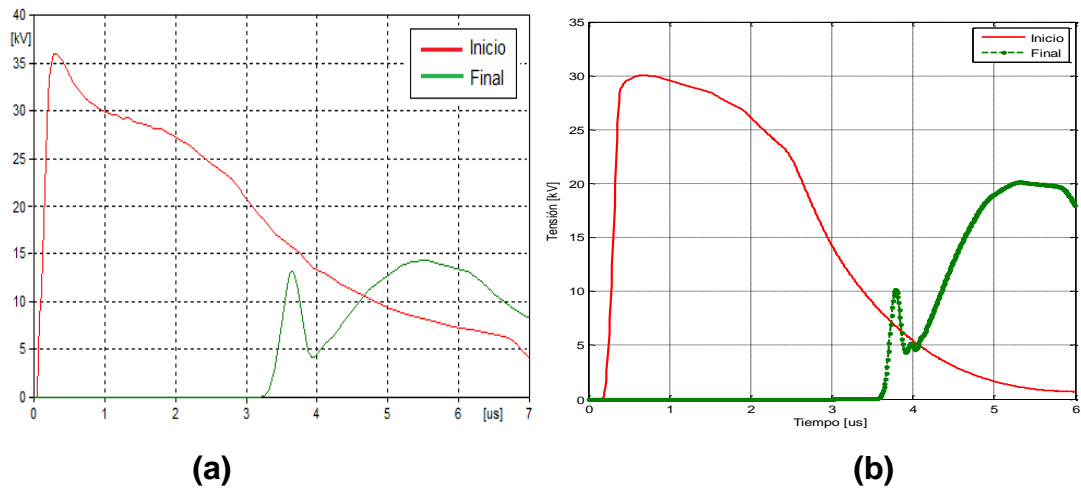
Figura 11. Tensión inducida sin DPS en el inicio y final de la línea para caso 1, (a) Yaluk Draw ®, (b) FDTD 3D



Seguido se mostrarán las tensiones inducidas con la presencia del DPS y lo que sucede en cada extremo de la línea cuando este actúa.

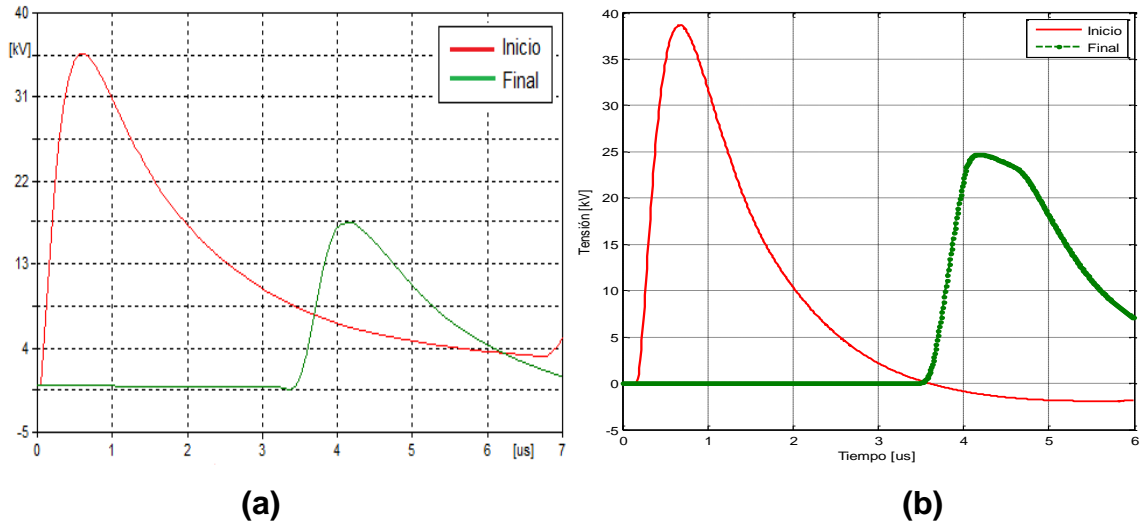
La figura 12, presenta la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (punto de observación P1 y P2, ver figura 10) cuando el DPS se encuentra ubicado al inicio de la línea.

Figura 12. Tensión inducida al inicio y final de la línea para caso 1 cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea, (a) Yaluk Draw®, (b) FDTD 3D



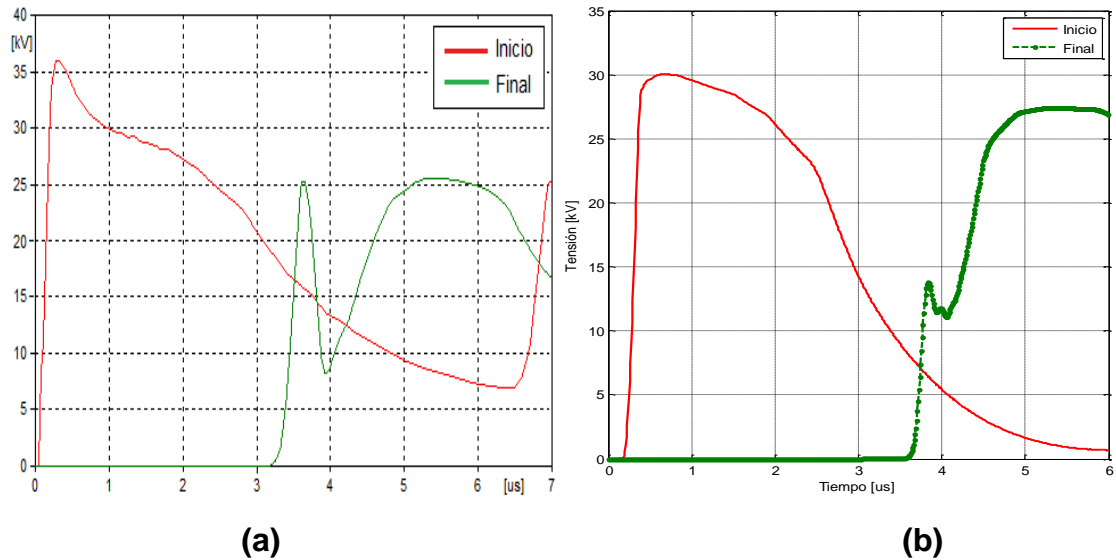
La figura 13, muestra la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (punto de observación P1 y P2, ver figura 10) cuando el DPS se encuentra ubicado al final de la línea.

Figura 13. Tensión inducida al inicio y final de la línea para caso 1 cuando el DPS está ubicado al final de la línea, (a) Yaluk Draw®, (b) FDTD 3D



La figura 14, presenta la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (punto de observación P1 y P2, ver figura 10) cuando el DPS se encuentra ubicado en ambos extremos de la línea.

Figura 14. Tensión inducida al inicio y final de la línea para caso 1 cuando el DPS está ubicado al inicio y final de la línea, (a) Yaluk Draw®, (b) FDTD 3D



Se presentan en la tabla 1, los resultados obtenidos de la tensión inducida en ambos softwares para el caso 1 de simulación (terreno plano con descarga a 50 m del inicio de la línea), teniendo en cuenta cada posición del descargador de sobretensión.

Tabla 1. Resultados caso 1, terreno plano

CASO 1	TENSIÓN INDUCIDA [kV]			
	TERRENO PLANO			
Software utilizado	YALUK DRAW		FDTD 3D	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
Sin DPS	35,5	8,7	38,7	13,7
DPS al inicio de la línea	35,8	14,2	30	20,1
DPS al final de la línea	35,6	17,5	38,6	24,6
DPS al inicio y final de la línea	35,9	25,6	30	27,4

Una singularidad en la comparación de los datos, como se puede observar en la tabla 1, las tensiones inducidas al final de la línea, en los diferentes arreglos de posiciones del DPS, aumentan de 1,5 a 3 veces su valor respecto a los datos de tensión cuando no hay presencia del descargador, esta información es consecuente con el resultado encontrado en [8], donde la presencia de DPS incrementa la tensión inducida.

4.1.2 Resultados caso 2 En esta sección se presenta el caso 2 cuando la descarga se encuentra en la mitad a 50 m de la línea (punto A1) como se puede apreciar en la figura 15, los resultados de los diferentes arreglos de simulaciones de tensiones inducidas (con y sin DPS) de ambos softwares se muestran tabulados (ver tabla 2) vistos desde los puntos de observación (P1 y P2, inicio y final de la línea respectivamente).

Figura 15. Vista superior Y 3D de la descarga para caso 2 (terreno plano con descarga en la mitad a 50 metros de la línea)

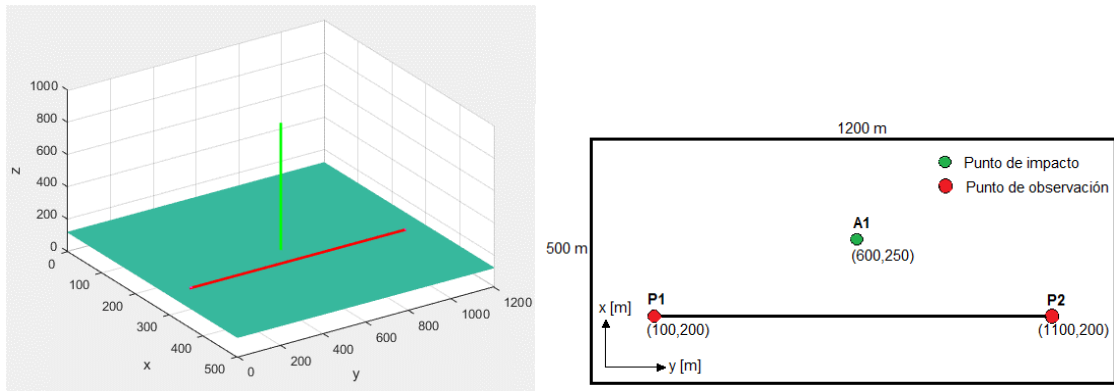


Tabla 2. Resultados caso 2, terreno plano

CASO 2	TENSIÓN INDUCIDA [kV]			
	TERRENO PLANO			
Software utilizado	YALUK DRAW		FDTD 3D	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
Sin DPS	66,5	66,5	66,1	66,1
DPS al inicio de la línea	45,4	66,5	30,9	66,1
DPS al final de la línea	66,5	45,4	66,1	30,9
DPS al inicio y final de la línea	45,4	45,4	31,2	31,2

Comparando los valores de tensión inducida sin presencia del DPS de las tablas 1 y 2 se observa un incremento de la tensión por el cambio de posición de descarga del inicio de la línea (caso1) a la mitad de la línea (caso 2).

Un aspecto importante que se debe mencionar, es que los resultados de las simulaciones con Yaluk Draw ®, al momento de incluir los descargadores de sobretensión, presenta valores máximos fuera de lo esperado (30-36 kV) ver figura 12, 13, 14. Debido a como programado el descargador de sobretensión no permite operar con valores de inductancia menores a 0,022 mH y 15 Ω de resistencia [9].

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Las simulaciones realizadas para terreno plano llevan a verificar el correcto funcionamiento de los descargadores de sobretensión utilizados en los softwares, debido a que las tensiones inducidas obtenidas en cada caso son similares (tabla 1 y 2); además cuando el DPS actúa su valor se encuentra alrededor de los 30-36 kV, lo cual concuerda con los valores de su curva característica.
- Al momento de cambiar la posición de la descarga, pasar del caso 1 (impacto al inicio de la línea) al caso 2 (impacto en la mitad de la línea), el funcionamiento del descargador de sobretensión no se ve afectado, como se observa en la tabla 1 y 2, el valor de la tensión inducida se reduce aproximadamente a 30-36 kV.
- Por medio de la comparación de los resultados que se encuentran en las tablas 1 y 2, se lleva a cabo la respectiva validación del funcionamiento de los descargadores de sobretensión en el software FDTD 3D. De esta manera se puede proceder a realizar nuevas simulaciones de tensiones inducidas utilizando los elementos de protección de las líneas en entornos de terrenos no planos.
- Al ver los resultados de las tensiones inducidas en el caso 2 (descarga en la mitad a 50 m de la línea), se observa que las tensiones (vista desde los puntos P1 y P2) son iguales para cualquier tipo de arreglo sin DPS, por tal razón esto lleva a concluir que las simulaciones que se realicen con descarga en la mitad de la línea, utilizando un terreno plano, tendrán como resultado valores iguales de tensiones inducidas al inicio y final de la línea.

5. TENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS EN ZONA DE MONTAÑA CONSIDERANDO EL EFECTO DE DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN EN LÍNEAS AÉREAS

Partiendo de las diferentes metodologías expuestas, se han desarrollado innumerables trabajos de medición, análisis, estudio de campos electromagnéticos y tensiones inducidas generadas por impacto de rayo, pero enfocados en terrenos planos.

Con el fin de incluir el efecto de la topografía del terreno en el cálculo de tensiones inducidas, no es posible utilizar las tradicionales ecuaciones de Master y Uman [29] ya que éstas son sólo válidas para terreno plano. La aproximación al problema consiste en usar una metodología numérica que permita obtener tanto el campo electromagnético producido por la descarga, así como la tensión inducida [8].

El propósito de este capítulo consiste en utilizar el software FDTD 3D para calcular las tensiones inducidas realizando simulaciones en diferentes topografías con diversas inclinaciones, para observar el efecto del descargador de sobretensión variando su ubicación cuando se presentan los diversos casos de descarga cerca de las líneas, llevando a cabo la realización del tercer objetivo específico y por consiguiente el general.

Las diferentes propuestas de los terrenos no planos en este capítulo, son topografías típicas encontradas en Colombia que presentan variaciones en su ángulo de inclinación entre 10° , 20° y 30° , siendo estos, valores típicos que se presentan en zona de montaña de acuerdo a la revisión hecha en [8].

Los terrenos propuestos para este capítulo son:

- Terreno A: Terreno en forma de V. (Figura 17)
- Terreno B: Terreno montaña. (Figura 22)
- Terreno C: Terreno hueco. (Figura 27)
- Terreno D: Terreno en forma de W. (Figura 28)

Las diferentes posiciones utilizadas de los DPS son:

- DPS al inicio de la línea
- DPS al final de la línea
- DPS al inicio y final de la línea

Las diferentes posiciones de descarga son:

- Descarga a 50 m del inicio de la línea
- Descarga a 50 m de un cuarto de la línea
- Descarga a 50 m de la mitad de la línea

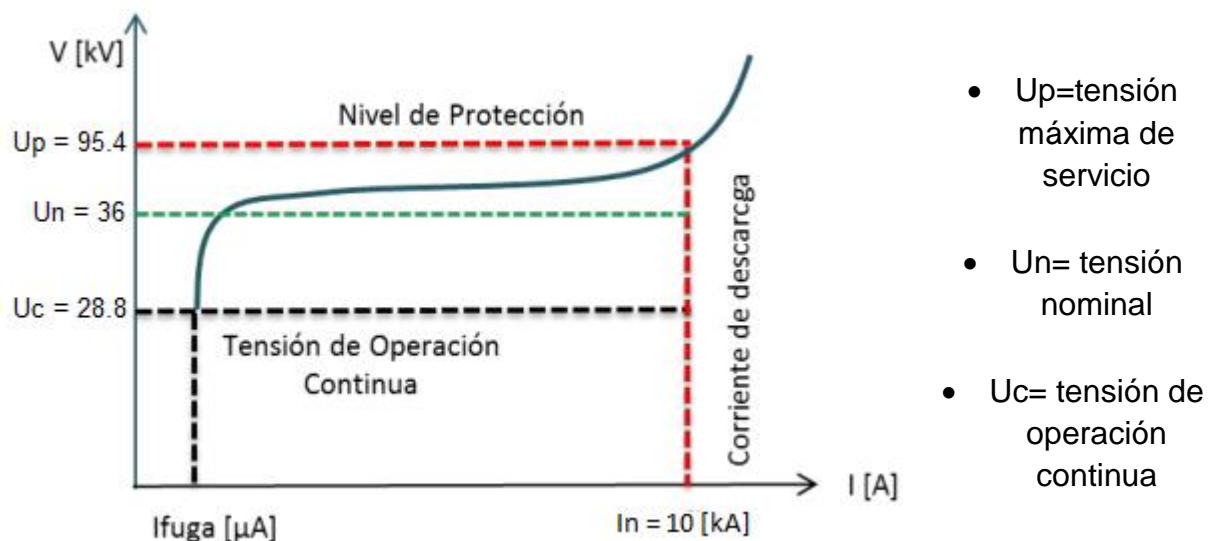
Para estas simulaciones se emplea el mismo escenario descrito en el capítulo anterior (ver figura 8) y lo único que se varia es la topografía.

Para cada terreno propuesto se efectúan simulaciones en diferentes posiciones de impacto de rayo (impacto: al inicio, a un cuarto y a la mitad; todos a 50 m de la línea), variando la inclinación de cada terreno en ángulos de **10°**, **20°** y **30°**, al igual que la ubicación del descargador de sobretensión como se realizó en el capítulo anterior.

Se opta por presentar detalladamente en este capítulo los resultados cuando la descarga se encuentra a 50 m del inicio de la línea, con ángulo de inclinación para todas las configuraciones de terreno de 10° y con cada una de las diferentes ubicaciones del descargador de sobretensión. Porque, al variar tanto el ángulo, la

configuración de terreno y punto de impacto; los resultados obtenidos de las tensiones inducidas son superiores y se salen del rango de operación del DPS seleccionado para este trabajo de grado. (34,5 kV) El cual solo está diseñado para soporta una sobretensión ante impacto de rayo de 95,4 kV.[30][31] como se puede apreciar en la figura 16.

Figura 16. Curva característica (V-I) de un DPS, adaptado de Especificaciones técnicas para descargadores de sobretensión en media tensión, 2015



5.1 RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SOFTWARE FDTD 3D PARA TERRENO NO PLANO

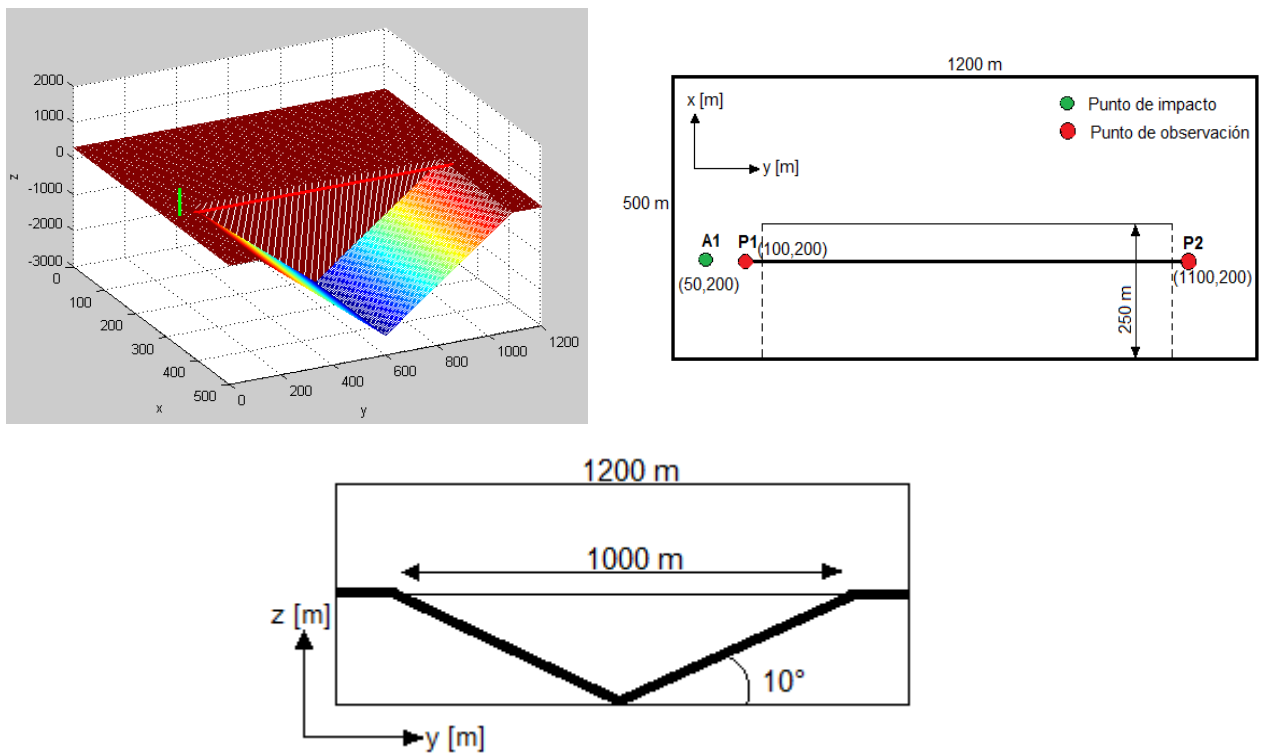
La simulación de los escenarios planteados en terreno no plano con el software FDTD 3D, se realizan con el fin de observar el funcionamiento que tienen los descargadores de sobretensión cuando se encuentran en zona montañosa.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las tensiones inducidas para cada caso y cómo cada arreglo de los DPS afecta dicha tensión.

5.1.1 Resultado terreno A En esta sección se plantea la configuración del terreno A (terreno en forma de V). Su forma en V presenta una longitud de 1000 m y un ancho de 250 m, su profundidad varía dependiendo del ángulo de inclinación, para este caso se presentan datos para una inclinación de 10° . El impacto (A1) se encuentra a 50 m del inicio de la línea (ver figura 17).

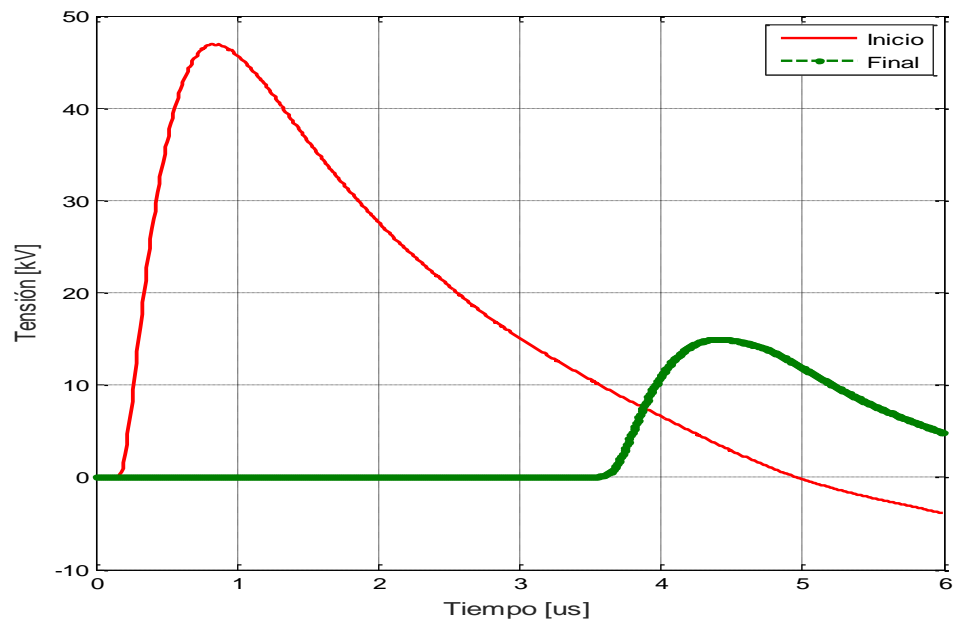
Primero se mostrarán los resultados sin tener en cuenta el efecto del DPS (figura 18), seguido se exponen los valores de tensión teniendo en cuenta el descargador en cada una de sus posiciones (figura 19, 20,21,22) y luego se presentan los resultados tabulados vistos desde los puntos de observación (P1 y P2, inicio y final de la línea respectivamente como se puede apreciar en la figura 17) para cada uno de los diferentes impactos de la descarga propuestos anteriormente (tablas 3, 4 y 5).

Figura 17. Vista 3D, superior y frontal del terreno A (terreno en forma de V)



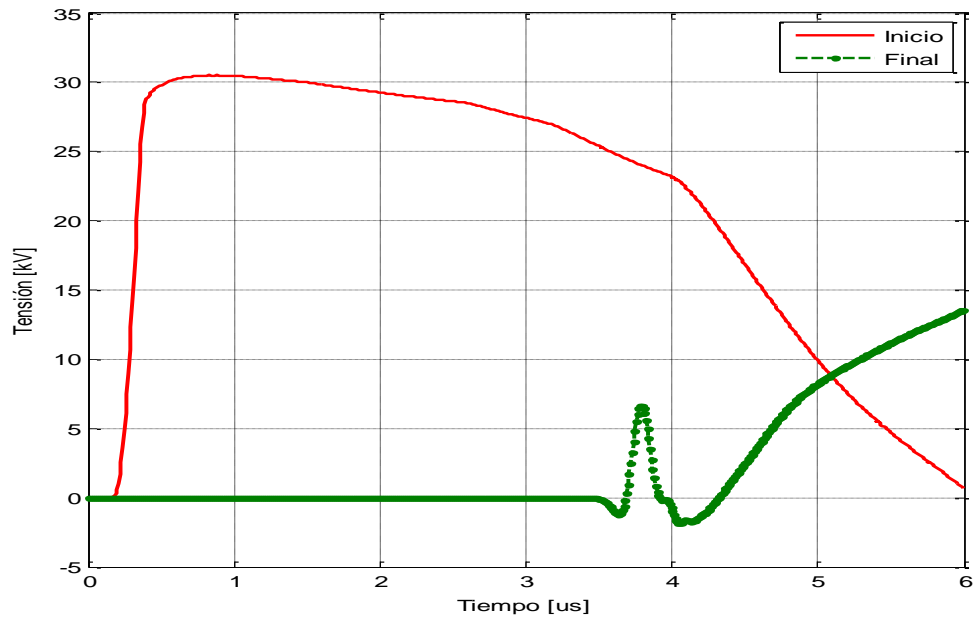
La figura 18, muestra el resultado de la tensión inducida que se presenta al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2 en la figura 17), sin la inclusión del DPS para la configuración de terreno A.

Figura 18. Tensión inducida sin DPS en el inicio y final de la línea para terreno A



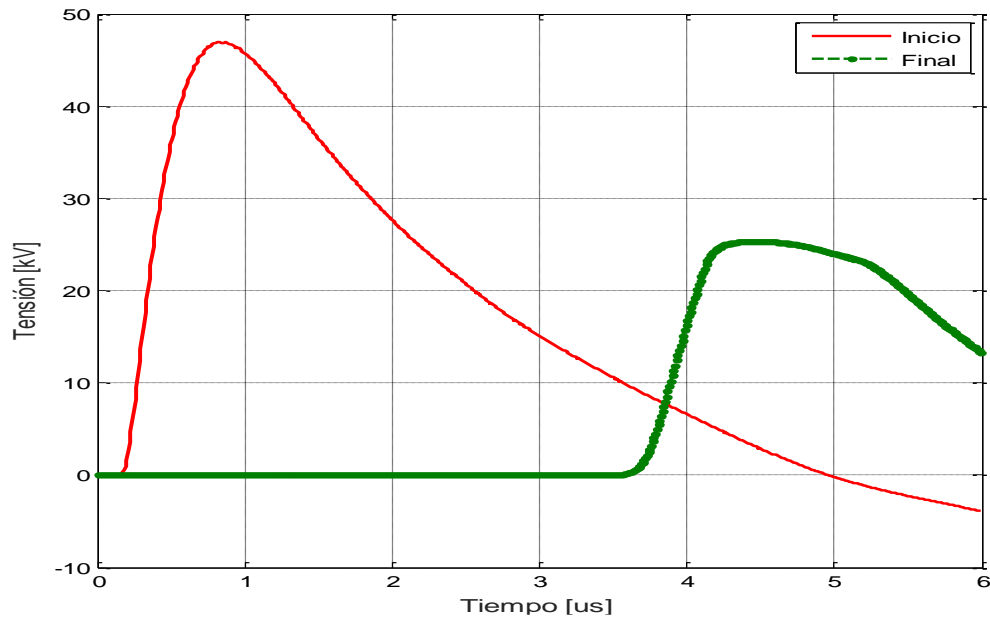
La figura 19, muestra el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2 en la figura 17), cuando el DPS se encuentra ubicado al inicio de la línea para la configuración de terreno A.

Figura 19. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea



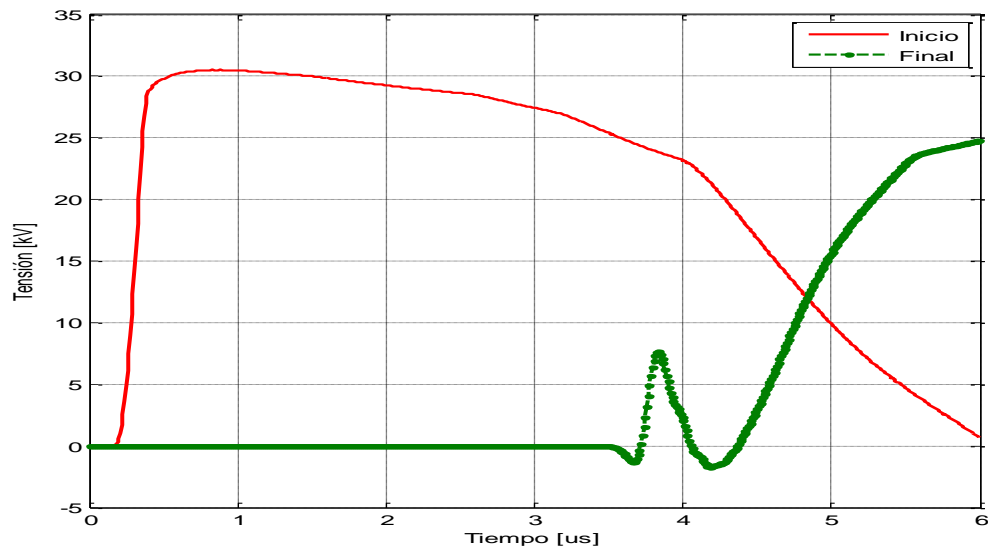
La figura 20, presenta el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2 en la figura 17), cuando el DPS se encuentra ubicado al final de la línea para la configuración de terreno A.

Figura 20. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al final de la línea



La figura 21, muestra el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2 en la figura 17), cuando el DPS se encuentra ubicado en ambos extremos de la línea para la configuración de terreno A.

Figura 21. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al inicio y al final de la línea



En la tabla 3, se presenta los resultados obtenidos de tensión inducida para la configuración de terreno A, teniendo en cuenta cada posición del descargador de sobretensión y cada ángulo de inclinación del terreno.

Tabla 3. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) del terreno A

Tensión inducida terreno A [kV]						
Descarga a 50 m del inicio de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
Sin DPS	46,9	15	53,4	13,1	57,3	11
DPS inicio	30,5	14	30,9	11,3	31,1	10,4
DPS final	46,9	25,4	53,4	24,2	30,9	22,1
DPS inicio y final	30,5	24,8	30,5	24,8	31,1	19

- En la tabla 3 se puede resaltar que, al variar el ángulo de inclinación del terreno, la tensión inducida al inicio de la línea cuando no hay presencia del descargador

de sobretensión se incrementa aproximadamente en un 10% y al final de la línea disminuye en una misma proporción respecto al valor de tensión del ángulo anterior.

- Observando los datos de la tabla 3 se debe resaltar que la configuración de terreno A, respecto a la configuración de terreno plano (Tabla 1), sin presencia del DPS la tensión inducida aumenta en el inicio de la línea, en un 21% para inclinación de 10°, 38% para 20° y 48% para 30°.
- En la tabla 3 se aprecia que el DPS está funcionando a cabalidad cuando se ubica al inicio de la línea debido a que está reduciendo la tensión inducida a los valores nominales esperados (aproximadamente 30-36 kV).

A continuación, respectivamente para cada sección (sección de terreno A, B, C, D) se muestran los resultados, cuando se cambia el punto de impacto de la descarga (descarga a 50m de un cuarto de línea y a la mitad de la línea) y teniendo en cuenta las ubicaciones de los DPS para las diferentes configuraciones de terreno.

Una singularidad en los resultados, son los valores de tensión que superan el rango de operación del DPS (tensión máxima de servicio 95,4 Kv) como se observa en las tablas 7, 4, 5, 10, 11, 13, 14. Estos datos se clasifican como fuera de rango puesto que al llevarlos a un entorno real generarán fallas en los descargadores de sobretensión (**ver anexos graficas**).

Tabla 4. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno A

Tensión inducida terreno A [kV]						
Descarga a 50 m de ¼ de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	128,5	134,1	136,4	150,1	138,3	155,3
DPS inicio	**	134,1	**	150,1	**	155,3
DPS final	128,5	**	136,4	**	138,4	**
DPS inicio y final	**	**	**	**	**	**

** Fuera de rango

Tabla 5. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno A

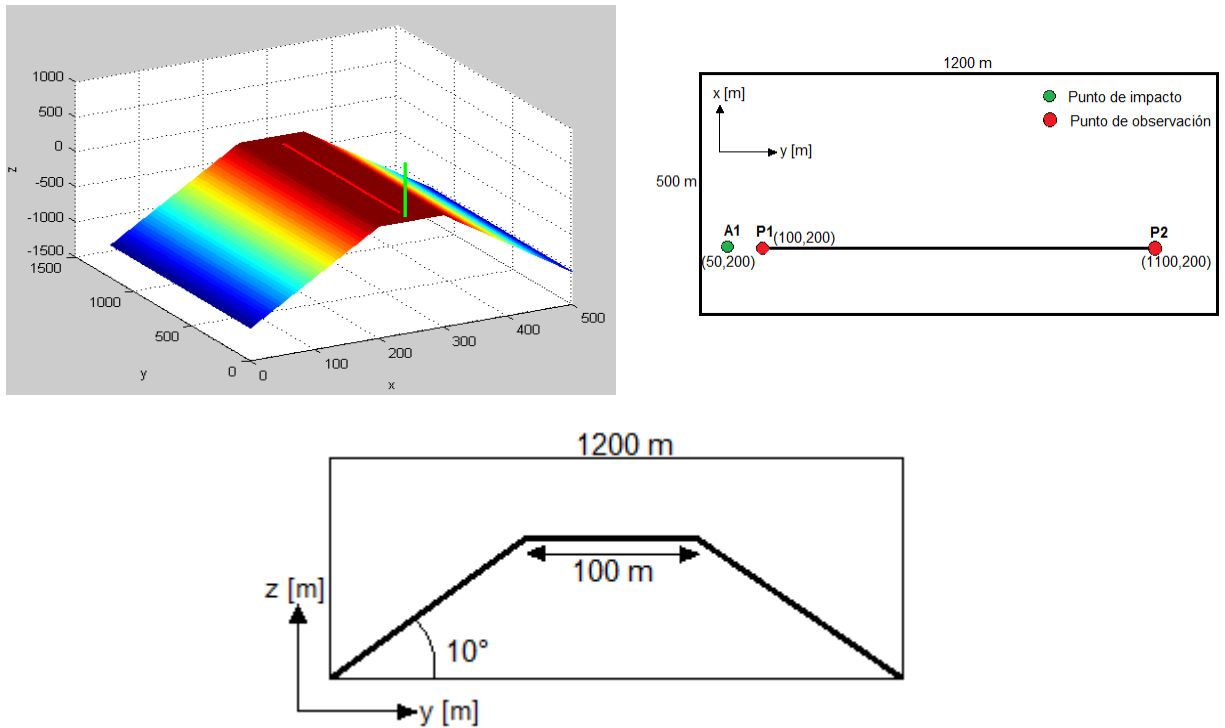
Tensión inducida terreno A [kV]						
Descarga a 50 m de la mitad de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea	Final de línea	Inicio de línea	Final de línea	Inicio de línea	Final de línea
sin DPS	147,9	147,9	151,5	151,5	151,9	151,9
DPS inicio	**	147,9	**	151,5	**	151,9
DPS final	147,9	**	151,5	**	151,9	**
DPS inicio y final	**	**	**	**	**	**

** Fuera de rango

5.1.2 Resultado terreno B. En esta sección se plantea la configuración del terreno B (terreno montaña). Su forma de montaña presenta una longitud de 1200 m, un ancho de 500 m y su altura varía de acuerdo con el ángulo de inclinación, para el caso presentado en este trabajo de grado es de 10°. La línea se ubica en la parte más elevada del terreno, la cual tiene un ancho de 100 m. El impacto (A1) se encuentra a 50 m del inicio de la línea (ver figura 22).

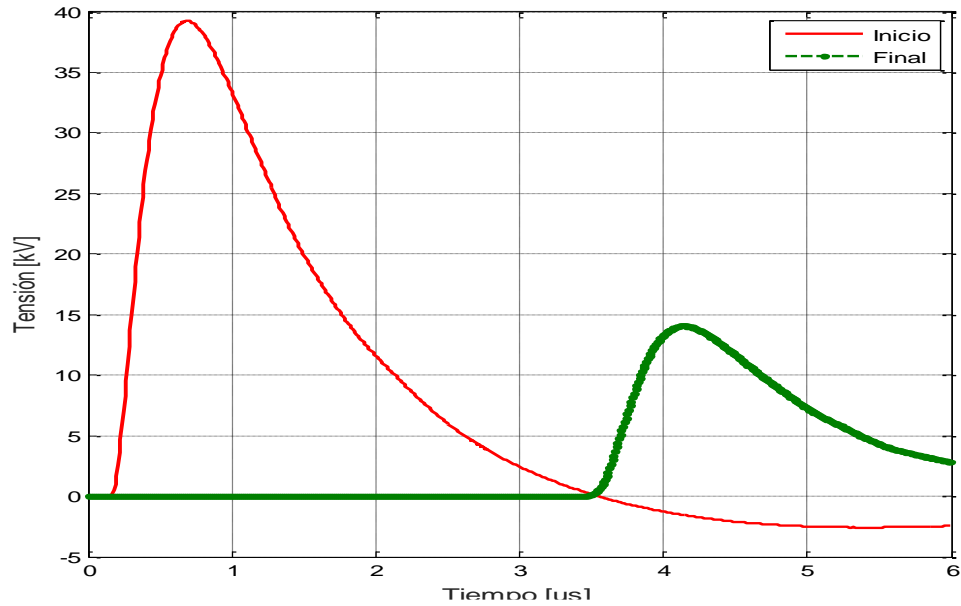
Los resultados tanto de tensión inducida como de datos tabulados se presentarán de la misma manera como se hizo en la sección anterior (ver figuras 23, 24, 25, 26 y tablas 6, 7 y 8)

Figura 22. Vista 3D, superior y frontal del terreno B (terreno de montaña).



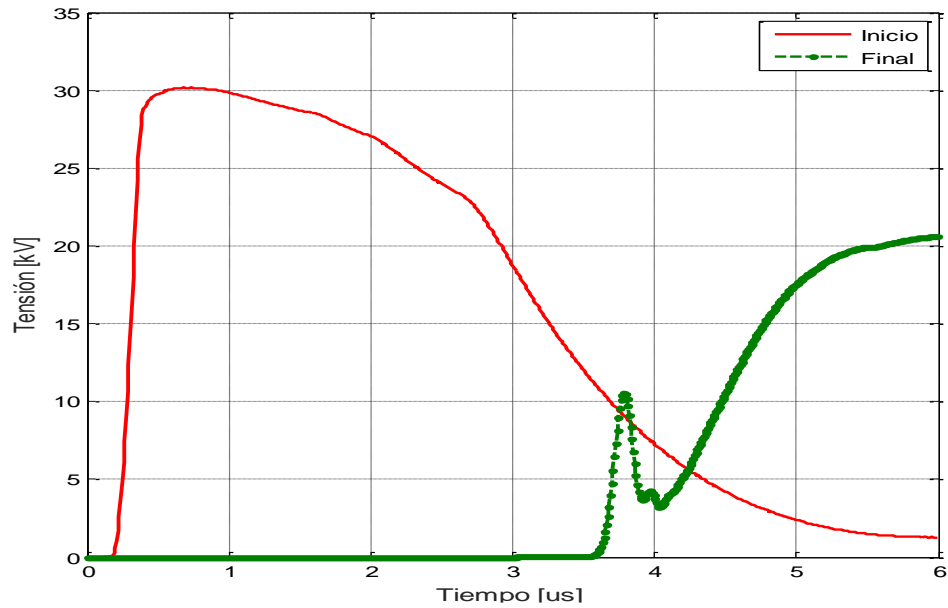
La figura 23, muestra el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2, ver figura 22), sin la inclusión del DPS para la configuración de terreno B.

Figura 23. Tensión inducida sin DPS en el inicio y final de la línea para terreno B



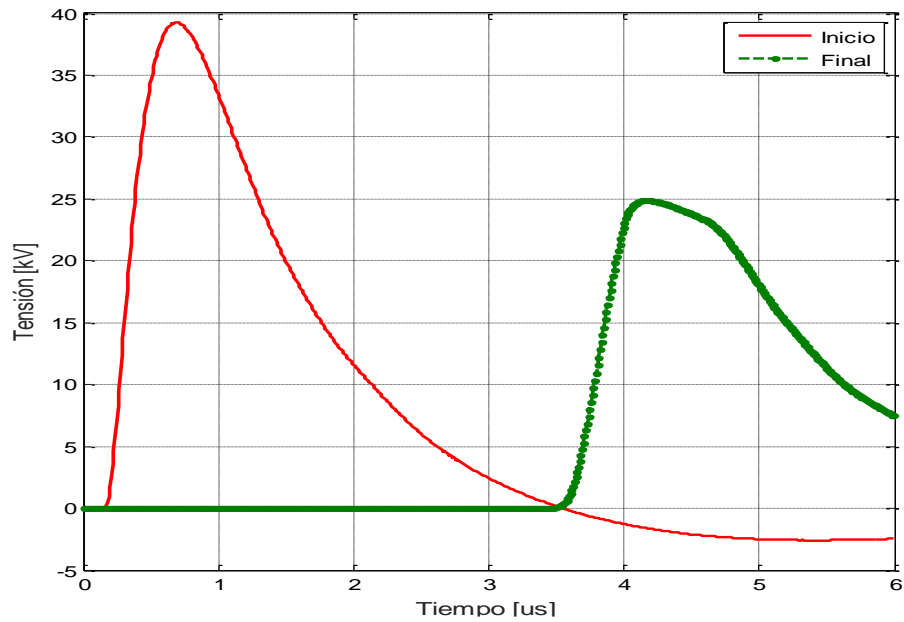
La figura 24, muestra el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2, ver figura 22), cuando el DPS se encuentra ubicado al inicio de la línea para la configuración de terreno B.

Figura 24. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno B cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea.



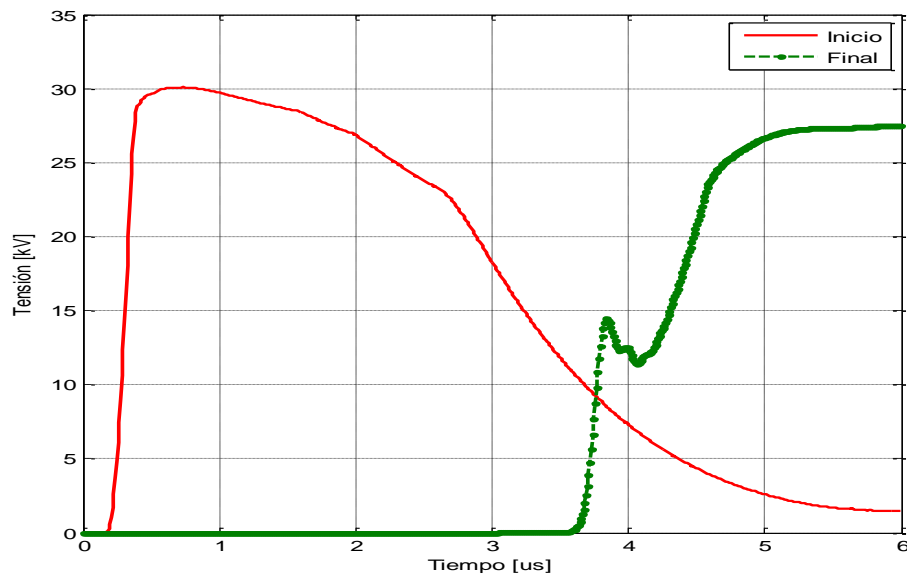
La figura 25, muestra el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2, ver figura 22), cuando el DPS se encuentra ubicado al final de la línea para la configuración de terreno B.

Figura 25. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al final de la línea



La figura 26, muestra el resultado de la tensión inducida generada al inicio y final de la línea (puntos de observación P1 y P2, ver figura 22), cuando el DPS se encuentra ubicado en ambos extremos de la línea para la configuración de terreno B.

Figura 26. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno B cuando el DPS está ubicado al inicio y al final de la línea



En la tabla 6, se presenta los resultados obtenidos de tensión inducida para la configuración de terreno B, teniendo en cuenta cada posición del descargador de sobretensión y cada ángulo de inclinación del terreno.

Tabla 6. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) del terreno B

Tensión inducida terreno B [kV]						
Descarga a 50 m del inicio de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
Sin DPS	39,3	14,1	40,1	14,4	40,6	14,8
DPS inicio	30,2	20,6	30,3	20,6	30,4	21,1
DPS final	39,2	24,9	40,1	25,1	40,6	25,3
DPS inicio y final	30,1	27,5	30,3	27,5	30,2	27,5

- En la tabla 6 se puede resaltar que, al variar el ángulo de inclinación del terreno, la tensión inducida al inicio de la línea cuando no hay presencia del descargador de sobretensión, se incrementa aproximadamente en un 2% respecto al valor de tensión del ángulo anterior y al final de la línea no presenta cambio; por lo tanto, el incremento en la tensión que se presenta por la variación del ángulo no es significativo en el terreno montañoso.
- Cuando no hay presencia del DPS, se debe resaltar que la configuración de terreno B, respecto a la configuración de terreno plano (tabla 1), la tensión inducida aumenta en el inicio de la línea, en un 1% para inclinación de 10°, 3% para 20° y 5% para 30°. Lo cual afirma la observación anterior.
- En la tabla 6, cuando se ubica el DPS en el inicio de la línea se puede apreciar que además de reducir los valores de tensión en su nodo de aplicación, también incrementa de manera significativa las tensiones al final de la línea aproximadamente 1,4 veces el valor sin DPS.

Cabe resaltar que, para la configuración de terreno B, al cambiar el punto de impacto de la descarga (descarga a 50m de $\frac{1}{4}$ de línea y a la mitad de la línea) se observa que los resultados están en el rango de acción del DPS (95,4 kV) (tablas 7 y 8), lo que quiere decir que el descargador utilizado es el indicado para la protección de líneas de distribución en este tipo de configuración.

Tabla 7. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno B

Tensión inducida terreno B [kV]						
Descarga a 50 m de ¼ de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	66,8	68,4	68,7	70,3	70,1	71,6
DPS inicio	30,6	68,4	30,7	70,3	30,8	71,6
DPS final	66,8	31,3	68,7	31,4	70,1	31,5
DPS inicio y final	30,6	31,3	30,7	31,4	30,8	31,5

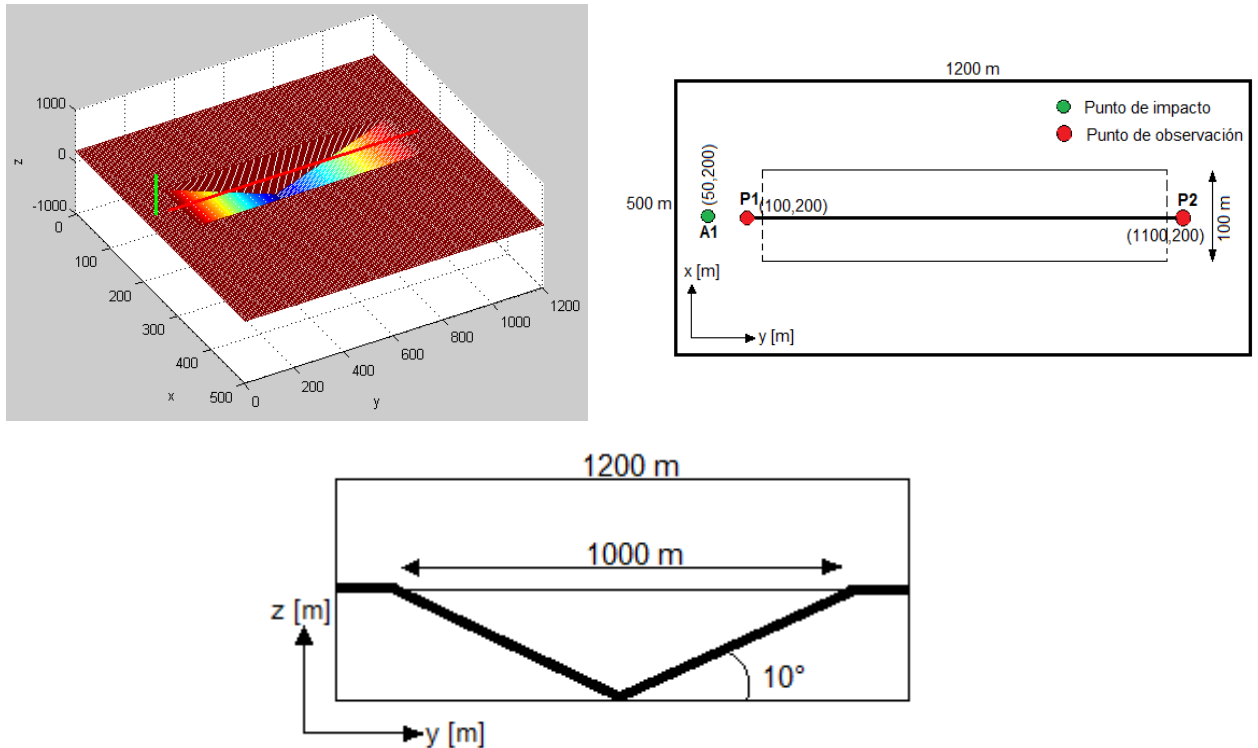
Tabla 8. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno B

Tensión inducida terreno B [kV]						
Descarga a 50 m de la mitad de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	67,9	67,9	69,9	69,9	71,4	71,4
DPS inicio	31	67,9	31,1	69,9	31,2	71,4
DPS final	67,9	31,3	69,9	31,4	71,4	31,5
DPS inicio y final	31,3	31,3	31,4	31,4	31,5	31,5

5.1.3 Resultado terreno C En esta sección se plantea la configuración del terreno C (terreno hueco). Su forma presenta una similitud con el terreno A (terreno en V) su parte hueca presenta un ancho de 100 m, una longitud de 1000 m y la profundidad del hueco varia con la inclinación del ángulo, para este caso se presenta una inclinación de 10°. La línea se ubica por encima del hueco de manera centrada y la descarga se presenta a 50 m del inicio de la línea (ver figura 27).

Para esta sección solo se presentan los resultados tabulados de la misma manera como se hizo en la sección anterior (ver tablas 9, 10 y 11).

Figura 27. Vista 3D, superior y frontal del terreno C (terreno hueco)



En la tabla 9, se presenta los resultados obtenidos de tensión inducida para la configuración del terreno C, teniendo en cuenta cada posición del descargador de sobretensión y cada ángulo de inclinación del terreno.

Tabla 9. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) para terreno C

Tensión inducida terreno C [kV]						
Descarga a 50m del inicio de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
Sin DPS	39,7	14,9	43,6	14,8	46,4	14,8
DPS inicio	30,1	16,1	30,3	16,2	30,4	16,4
DPS final	39,7	25,3	43,6	25,3	46,4	25,41
DPS inicio y final	30	26,1	30,3	26,1	30,4	26,2

- En la tabla 9, se puede observar al igual que los resultados de la tabla 3, que, variando el ángulo de inclinación del terreno, la tensión inducida al inicio de la línea cuando no hay presencia del descargador de sobretensión se incrementa aproximadamente en un 8% respecto al valor de tensión del ángulo anterior.
- Los resultados de tensión inducida del terreno C respecto al terreno plano (tabla 1) cuando no hay presencia del DPS, presentan un aumento en el inicio de la línea, en un 3% para inclinación de 10°, 12% para 20° y 19% para 30° pero estas cifras varían respecto a que tan ancho sea el hueco.
- En la tabla 9, se puede apreciar que el DPS cuando está ubicado al inicio de la línea actúa de la forma esperada (disminuyendo el valor de la tensión a un valor aproximado de 30 kV), y cuando se ubica al final de la línea la tensión presenta un incremento de 1,4 veces el valor sin DPS.

Tabla 10. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno C

Tensión inducida terreno C [kV]						
Descarga a 50m de ¼ de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	118,5	119,4	122,9	127,3	123,8	129,6
DPS inicio	**	119,4	**	127,3	**	129,6
DPS final	118,5	**	122,9	**	123,8	**
DPS inicio y final	**	**	**	**	**	**

** Fuera de rango

Tabla 11. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno C

Tensión inducida terreno C [kV]						
Descarga a 50m de la mitad de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	129,7	129,7	130,2	130,2	130,2	130,2
DPS inicio	**	129,7	**	130,2	**	130,2
DPS final	129,7	**	130,2	**	130,3	**
DPS inicio y final	**	**	**	**	**	**

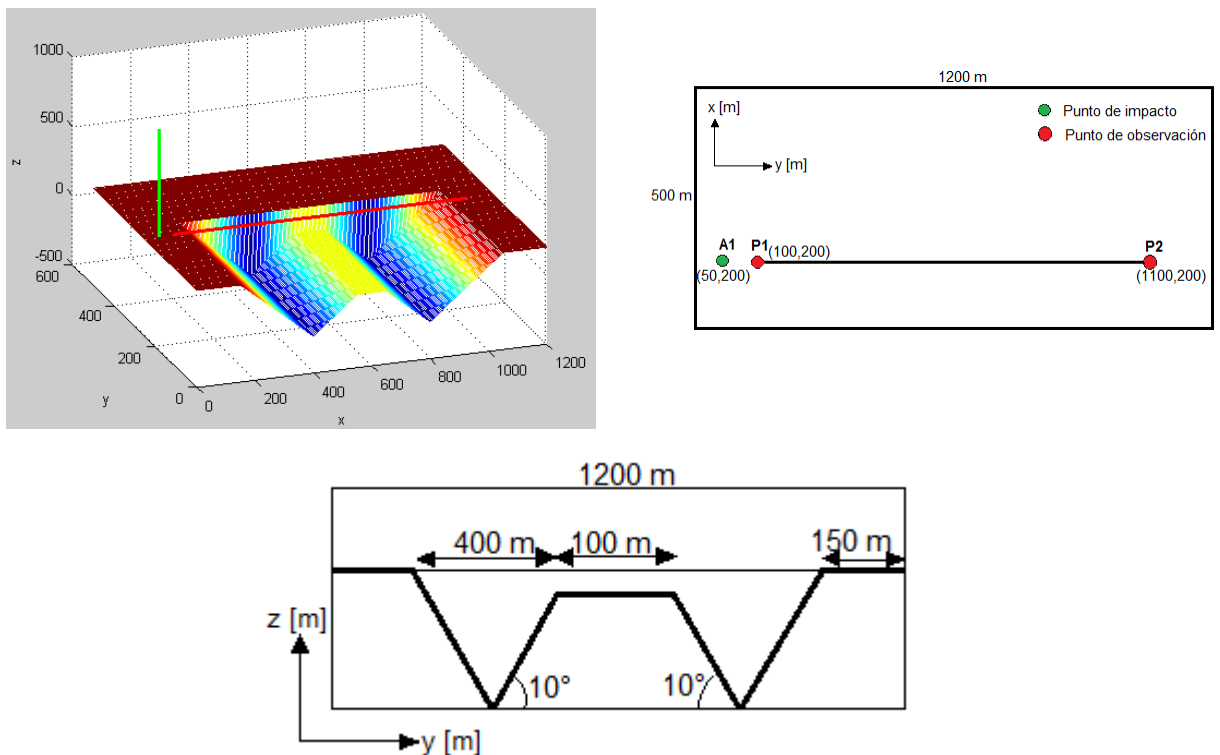
** Fuera de rango

5.1.4 Resultado terreno D En esta sección se plantea la configuración del terreno D (terreno en W), es una configuración híbrida la cual se diseñó de manera tal que incluyera los rasgos más significativos de las demás configuraciones. El terreno presenta un ancho de 250 m, una longitud de 1000 m, en su parte hueca se presentan dos pendientes en forma de V ubicadas a lado y lado de manera simétrica las cuales permanecen iguales así se varié el ángulo de inclinación, en medio de

estas pendientes se presenta una elevación simulando el terreno de montaña donde su parte más elevada presenta una planicie con un ancho de 100 m y su altura varía de acuerdo al ángulo seleccionado, para este caso el ángulo es de 10° y la descarga se encuentra a 50 m del inicio de la línea (ver figura 28).

Para esta sección solo se presentan los resultados tabulados de la misma manera como se hizo en la sección anterior (ver tablas 12, 13 y 14).

Figura 28. Vista 3D, superior y frontal del terreno D (terreno en forma de W)



En la tabla 12, se presenta los resultados obtenidos de tensión inducida para la configuración de terreno D, teniendo en cuenta cada posición del descargador de sobretensión y cada ángulo de inclinación del terreno.

Tabla 12. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m del inicio de la línea) del terreno D

Tensión inducida terreno D [kV]						
Descarga a 50 m del inicio de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
Sin DPS	39,4	13,8	42	12,2	44,6	10
DPS inicio	30,1	14,1	30,3	11,7	30,4	11,2
DPS final	39,4	24,7	42	23,9	44,6	21,7
DPS inicio y final	30,1	25,1	30,3	23,7	30,4	22,3

- En la tabla 12 se puede observar que, al variar el ángulo de inclinación del terreno, la tensión inducida al inicio de la línea cuando no hay presencia del descargador de sobretensión se incrementa aproximadamente en un 6% y al final de la línea disminuye en una proporción de 13% respecto al valor de tensión del ángulo anterior.
- Los resultados de tensión inducida del terreno D respecto al terreno plano (tabla 1) con la descarga a 50 m del inicio de la línea sin la presencia del DPS, presentan un aumento en el inicio de la línea, en un 2% para inclinación de 10°, 8% para 20° y 15% para 30°.

Tabla 13. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de 1/4 de la línea) del terreno D

Tensión inducida terreno D [kV]						
Descarga a 50 m de ¼ de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	124,1	124,7	132,9	141,3	135,3	148,4
DPS inicio	**	124,7	**	141,3	**	148,4
DPS final	124,1	**	132,9	**	135,3	**
DPS inicio y final	**	**	**	**	**	**

** Fuera de rango

Tabla 14. Resultados tensión inducida (descarga a 50 m de la mitad de la línea) del terreno D

Tensión inducida terreno D [kV]						
Descarga a 50 m de la mitad de la línea						
Inclinación	10°		20°		30°	
Punto de observación	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)	Inicio de línea (P1)	Final de línea (P2)
sin DPS	121,3	121,3	137,9	137,9	145	145
DPS inicio	**	121,3	**	137,9	**	145
DPS final	121,3	**	137,9	**	145	**
DPS inicio y final	**	**	**	**	**	**

** Fuera de rango

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Tomando como base los datos de tensión obtenidos a partir del terreno plano (tablas 1 y 2), se observa un incremento en la tensión inducida entre 1 a 3 kV cuando actúa el descargador de sobretensión al inicio de la línea en todos los

terrenos propuestos (A, B, C, D). Esto lleva a concluir que el funcionamiento del descargador no se ve afectado por el cambio de configuración de terreno.

- Con la descarga a 50 m del inicio de la línea en los terrenos A y C. La variación en el ángulo de inclinación no genera cambios críticos de tensión inducida cuando el descargador actúa. Pero en el momento de simular sin DPS, existe un incremento del 10% aproximadamente en la tensión inducida por cada 10° de aumento, como se puede apreciar en las tablas 3 y 5.
- En el terreno B, los valores de tensión inducida obtenidos cuando no hay presencia del DPS, son menores respecto a las demás configuraciones (terreno A, C y D). Esto lleva a concluir, que el terreno en forma de montaña (terreno B) es donde menos hay incidencia de las tensiones inducidas en las líneas de distribución generadas por los impactos indirectos de los rayos.
- Al igual que en terreno plano el descargador de sobretensión no siempre va a disminuir la tensión inducida. Se observa en las diferentes configuraciones de terreno no plano (terrenos A, B, C Y D) un aumento en la tensión inducida al final de la línea de 1,5 a 2 veces respecto al valor de tensión cuando no hay presencia del DPS, esto ocurre cuando la descarga es al inicio de la línea y el descargador está ubicado al final de la línea (tabla 3 a 6).
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las diferentes configuraciones de terrenos propuestos, se concluye que el terreno A es el terreno menos deseado al momento de instalar una línea de distribución, debido a que presenta los valores de tensión inducida más elevados de las 4 configuraciones (ver tabla 3, 4 y 5); y el terreno más óptimo y deseable para instalar la línea de distribución es el terreno B puesto que sus valores son muy similares a los de la configuración de terreno plano.

- Al observar los valores de la tabla 4 (terreno B), cuando el DPS se ubica al inicio de la línea, se puede apreciar un aumento en el final de la línea, aproximadamente del 44 % de la tensión inducida sin DPS; evento que no ocurre en las demás configuraciones de terreno (terreno A, C, D, tablas 3, 5 y 6 respectivamente).
- Al observar los valores tabulados, se puede decir que si el DPS está ubicado al inicio de la línea presentará un aumento de la tensión inducida al final de línea de 1,4 veces su valor sin DPS solo cuando la configuración de terreno no plano tiende a parecerse al terreno plano, en este caso el terreno B (terreno de montaña).
- Para las configuraciones de terrenos A, C y D, los resultados de tensión obtenidos superan el rango máximo de operación del DPS (95,4 kV) por lo tanto, el descargador seleccionado para la tesis no cumpliría con las exigencias necesarias para la protección de una línea de sistema de distribución y se tendrían que implementar otros métodos adicionales de protección para dar mayor confiabilidad, seguridad y calidad al sistema de distribución.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se puede concluir que la topografía en forma de v (terreno A), es la menos deseada para la ubicación de una línea de distribución.
- Se puede concluir que la topografía en forma de montaña es donde menos hay incidencia de las tensiones inducidas en las líneas de distribución generadas por los impactos indirectos de los rayos.
- El funcionamiento del descargador no se ve afectado por el cambio de configuración de terreno plano a no plano.
- Comparando los datos de tensiones inducidas de terreno plano con los del capítulo 3, se puede observar un incremento en un rango de 2 a 5 veces dependiendo de la topografía, a medida que la posición de la descarga se acerca a la mitad de la línea, esto ocurre cuando no hay presencia del descargador de sobretensión, por lo que lleva a aumentar la probabilidad de falla en la línea.
- Se concluye de los datos obtenidos que la mejor posición para el descargador de sobretensión es el inicio de la línea.
- Para mejorar la calidad de la energía y minimizar la salida de funcionamiento de las líneas, se debe tener en cuenta, la configuración del terreno donde va hacer utilizado el DPS. Puesto que los diferentes estudios para su selección están desarrollados en terrenos planos y los resultados de tensión inducida obtenidos demuestran que la topografía influye en el funcionamiento de este elemento de protección.

- En las diferentes configuraciones propuestas de terreno no plano, se encuentran valores de tensión inducida que indican una variación en el funcionamiento del DPS (fuera de rango). Lo que seguramente generara flameos y por consecuencia salida de funcionamiento de las líneas.
- Se recomienda evitar el uso de los descargadores de sobretensión al final de la línea por el incremento de tensión que produce.
- El DPS seleccionado no funciona a cabalidad en los terrenos A,C y D debido a que los valores obtenidos de tensión inducida están muy por encima del rango de operación .

7. TRABAJOS FUTUROS

- Implementar nuevos escenarios topográficos que se asemejen más a la realidad para obtener mejores resultados de tensiones inducidas y observar cómo afectan a los descargadores de sobretensión
- Implementar descargadores de sobretensión con diferentes curvas características (V-I) para obtener nuevos resultados de tensiones inducidas y evaluar si son óptimos tanto para las configuraciones implementadas en esta tesis como nuevas propuestas.
- Implementar métodos de programación que incluyan en el software elementos tales como torres, transformadores y demás que posee una línea de distribución con el fin de obtener resultados de tensiones inducidas más reales.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. F. J. Schonland, "Progressive Lightning part II," 1934.
- [2] C. Wagner and G. McCann, "Induced Voltages on Transmission Lines," *AIEE Trans.*, vol. 61, pp. 916–930, 1942.
- [3] A. K. Agrawal, H. J. Price, and S. H. Gurbaxani, "Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field Compatibility," *IEEE Trans. EMC*, vol. EMC 22, pp. 119–129, 1980.
- [4] C. D. Taylor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field," *IEEE Trans. AP*, vol. 13, 1965.
- [5] F. Rachidi, "Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, 1993, pp. 404–407.
- [6] E. Chowdhuri and T. Gross, "Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes," *Inst Elec Eng*, vol. 1967, pp. 1899–1907.
- [7] C. A. Nucci, F. Rachidi, and M. V. Ianoz, "Lightning Induced Voltages on Overhead Lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 35, no. 1, pp. 75–86, 1993.
- [8] E. Soto, "Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non-flat at terrains," 2014.

- [9] E. Pérez and E. Soto, "Yaluk Draw," 2010.
- [10] Comisión de regulación de energía y gas (CREG), "Identificación y análisis de los niveles de calidad del servicio alcanzables en las redes de distribución de energía eléctrica del SIN," 2013.
- [11] H. Torres, "El rayo: Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología, Colombia," 2002.
- [12] I. S. 1410-2010 I. Power and E. Society, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," vol. 2010, no. January, 2011.
- [13] E. Soto, "Estudio de las tensiones inducidas por rayos en redes de distribución aéreas ubicadas sobre terrenos no planos," 2012.
- [14] E. Pérez, "Modelado y experimentación de tensiones inducidas por rayo en redes de distribución," 2010.
- [15] E. Pérez, "Avance en el modelamiento y experimentacion de tensiones inducidas en redes de distribucion," 2006.
- [16] E. A. Soto Ríos, "Cálculo de campo electromagnético producido por un rayo para terreno no plano y su efecto en las tensiones inducidas en líneas de distribución," pp. 1–102, 2010.
- [17] J. Cardoso and C. Sartori, "An analytical-FDTD method for near LEMP calculation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 1631– 1634, 2000.
- [18] R. Moini, S. Sadegh, B. Kordi, and F. Rachidi, "An antenna-theory approach for modeling inclined lightning return stroke channels," *Electr. Power Syst.*

Res., vol. 76, no. 11, pp. 945–952, 2006.

- [19] Y. Baba, M. Ishii, and S. Member, “Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures,” vol. 16, no. 2, pp. 324–328, 2001.
- [20] D. J. R. J.-M. Jin, “Finite Element Analysis of Antenna and Arrays , 2009. John Wiley & Sons In, Hoboken,” 2009.
- [21] F. Napolitano, A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, and F. Rachidi, “Use of the Full-Wave Finite Element Method for the Numerical Electromagnetic Analysis of LEMP and its Coupling with Overhead Lines,” *7th Asia-Pacific Int. Conf. Light. Chengdu, China*, 2011.
- [22] The MathWork Inc, “Matlab.” 2013.
- [23] T. Noda and S. Yokoyama, “Thin Wire Representation in Finite Difference,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 3, pp. 840–847, 2002.
- [24] A. Tatematsu and T. Noda, “Three-dimensional FDTD calculation of lightning-induced voltages on a multiphase distribution line with the lightning arresters and an overhead shielding wire,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 1, pp. 159–167, 2014.
- [25] H. Torres-Sánchez, “¿ Qué rayos sabemos?,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 2010.
- [26] J. C. Medina Marín, E. Marlés Sáenz, and F. Castro Aranda, “Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución,” 2010.

- [27] E. de J. G. Malo and A. A. A. Arevalo, "Selección de descargadores de sobretensión de oxido metalico."
- [28] SIEMENS, "Descargadores de sobretensión 3EE Limitadores de sobretensión 3EF," 2008.
- [29] M. Uman and E. Krider, "The Electromagnetic Radiation from a finite antenna," *AJP*, vol. 43, 1975.
- [30] SIEMENS, "Descargadores de sobretensión de media tensión 3EK4 con envolverte de Silicona."
- [31] EPM, "Especificaciones técnicas para descargadores de sobretensiones DPS en media tensión," pp. 1–20, 2015.

BIBLIOGRAFÍA

AGRAWAL A. K., H. J. Price, and S. H. Gurbaxani, "Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field Compatibility," IEEE Trans. EMC, vol. EMC 22, pp. 119–129, 1980.

BABA Y., ISHII M., and MEMBER S., "Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures," vol. 16, no. 2, pp. 324–328, 2001.

C. A. Nucci, F. Rachidi, and M. V. Ianoz, "Lightning Induced Voltages on Overhead Lines," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 35, no. 1, pp. 75–86, 1993.

CARDOSO J. and SARTORI C., "An analytical-FDTD method for near LEMP calculation," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1631– 1634, 2000.

CHOWDHURI E. and GROSS T., "Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes," Inst Elec Eng, vol. 1967, pp. 1899–1907.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG), "Identificación y análisis de los niveles de calidad del servicio alcanzables en las redes de distribución de energía eléctrica del SIN," 2013.

EPM, "Especificaciones técnicas para descargadores de sobretensiones DPS en media tensión," pp. 1–20, 2015.

I. S. 1410-2010 I. Power and E. Society, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," vol. 2010, no. January, 2011.

JIN D. J. R. J.-M., "Finite Element Analysis of Antenna and Arrays , 2009. John Wiley & Sons In, Hoboken," 2009.

MALO E. de J. G. and AREVALO A. A. A., "Selección de descargadores de sobretensión de oxido metalico."

MATLAB The MathWork Inc, 2013.

MEDINA MARÍN J. C., MARLÉS SÁENZ E., and CASTRO ARANDA F., "Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución," 2010.

MOINI R., SADEGH S., KORDI B., and RACHIDI F., "An antenna-theory approach for modeling inclined lightning return stroke channels," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 11, pp. 945–952, 2006.

NAPOLITANO F., BORGHETTI A., NUCCI C. A., PAOLONE M., and RACHIDI F., "Use of the Full-Wave Finite Element Method for the Numerical Electromagnetic Analysis of LEMP and its Coupling with Overhead Lines," 7th Asia-Pacific Int. Conf. Light. Chengdu, China, 2011.

NODA T. and YOKOYAMA S., "Thin Wire Representation in Finite Difference," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 3, pp. 840–847, 2002.

PÉREZ E. and SOTO E., "Yaluk Draw," 2010.

PÉREZ E., "Avance en el modelamiento y experimentacion de tensiones inducidas en redes de distribucion," 2006.

PÉREZ E., “Modelado y experimentación de tensiones inducidas por rayo en redes de distribución,” 2010.

RACHIDI F., “Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field,” in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 35, 1993, pp. 404–407.

SCHONLAND B. F. J., “Progressive Lightning part II,” 1934.

SIEMENS, “Descargadores de sobretensión 3EE Limitadores de sobretensión 3EF,” 2008.

SIEMENS, “Descargadores de sobretensión de media tensión 3EK4 con envolvente de Silicona.”

SOTO E., “Estudio de las tensiones inducidas por rayos en redes de distribución aéreas ubicadas sobre terrenos no planos,” 2012.

SOTO E., “Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non-flat at terrains,” 2014.

SOTO RÍOS E. A., “Cálculo de campo electromagnético producido por un rayo para terreno no plano y su efecto en las tensiones inducidas en líneas de distribución,” pp. 1–102, 2010.

TATEMATSU A. and NODA T., “Three-dimensional FDTD calculation of lightning-induced voltages on a multiphase distribution line with the lightning arresters and an overhead shielding wire,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 1, pp. 159–167, 2014.

TAYLOR C. D., R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field," IEEE Trans. AP, vol. 13, 1965.

TORRES H., "El rayo: Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología, Colombia," 2002.

TORRES-SÁNCHEZ H., "¿Qué rayos sabemos?," Rev. Acad. Colomb. Cienc, 2010.

UMAN M. and KRIDER E., "The Electromagnetic Radiation from a finite antenna," AJP, vol. 43, 1975.

WAGNER C. and McCANN G., "Induced Voltages on Transmission Lines," AIEE Trans., vol. 61, pp. 916–930, 1942.

ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS OBTENIDOS DE TENSIONES INDUCIDAS MAYORES A 100 kV

En esta sección se mostrarán algunos de los resultados obtenidos de tensiones inducidas mayores a 100 kV para las distintas configuraciones de terrenos (terrenos A,C,D) cuando la descarga se encuentra en la mitad a 50 m de la línea y su inclinación en el terreno es de 10° , con el fin de mostrar que el software FDTD 3D es ideal y omite la restricción de tensión que posee el DPS seleccionado para este trabajo de grado (95,4 kV).

La figura 29 muestra la tensión inducida para el terreno A cuando el DPS se encuentra ubicado al inicio de la línea y con los parámetros anteriormente nombrados.

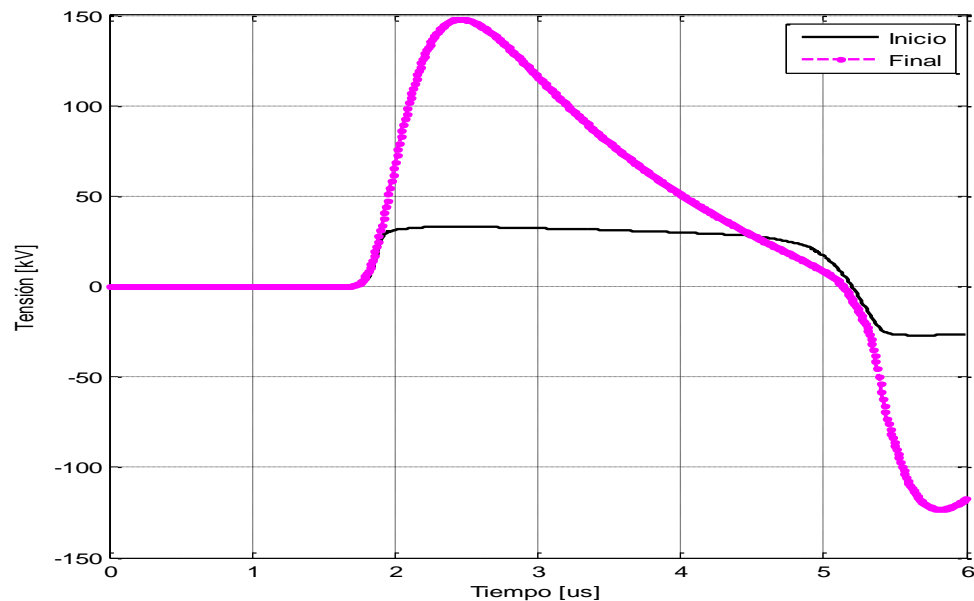


Figura 29. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno A cuando el DPS está ubicado al inicio de la línea.

La figura 30 muestra la tensión inducida para el terreno C cuando el DPS se encuentra ubicado al final de la línea y con los parámetros anteriormente nombrados.

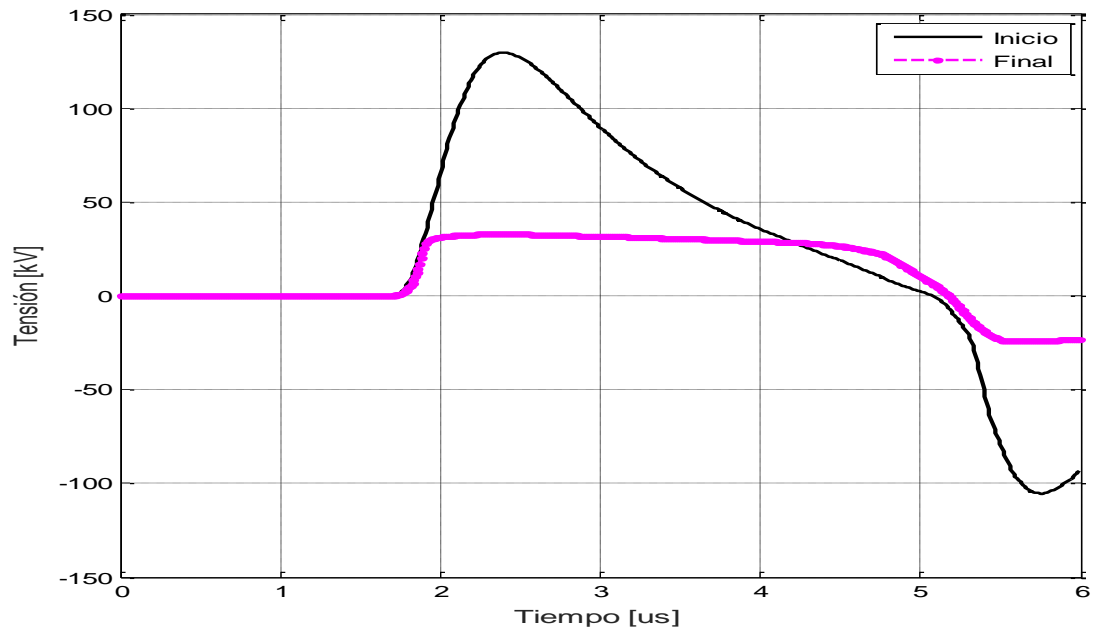


Figura 30. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno C cuando el DPS está ubicado al final de la línea

La figura 31 muestra la tensión inducida para el terreno D cuando el DPS se encuentra ubicado al final de la línea y con los parámetros anteriormente nombrados.

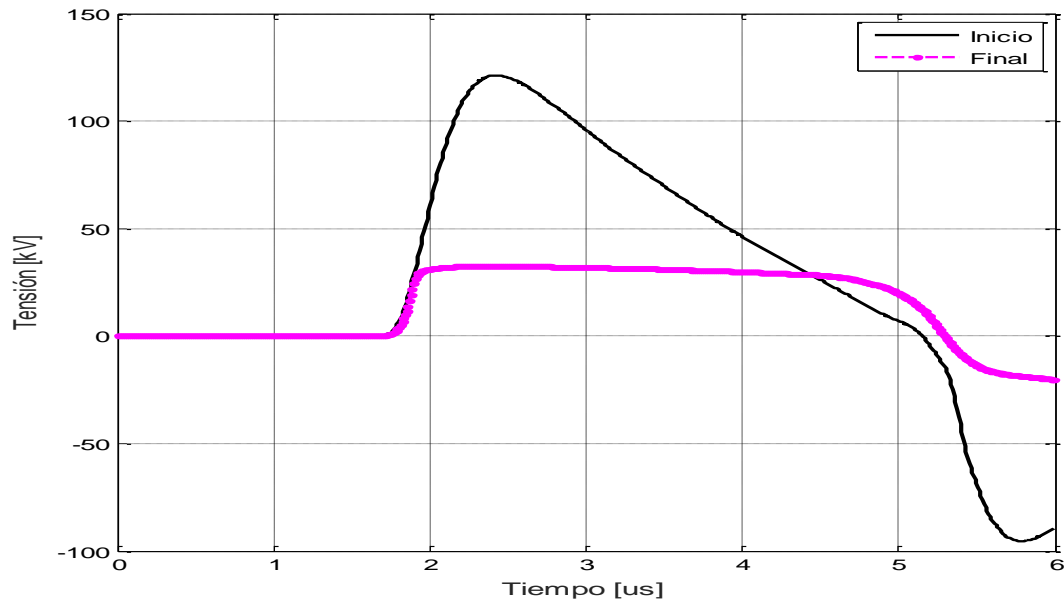


Figura 31. Tensión inducida al inicio y final de la línea para terreno D cuando el DPS está ubicado al final de la línea