

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LOS RAYOS EN EL ÍNDICE DE FALLAS
DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO LOS SISTEMAS DE PUESTA A
TIERRA DEL ESTÁNDAR IEEE 1243

JAIME ALEJANDRO MARIÑO ROJAS
JONATHAN ARMANDO MUÑOZ DELGADO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2019

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LOS RAYOS EN EL ÍNDICE DE FALLAS
DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO LOS SISTEMAS DE PUESTA A
TIERRA DEL ESTÁNDAR IEEE 1243

JAIME ALEJANDRO MARIÑO ROJAS
JONATHAN ARMANDO MUÑOZ DELGADO

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
EDISON ANDRES SOTO RIOS
Doctor en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

En primer lugar, doy gracias a Dios por darme la fortaleza de nunca rendirme, darme la salud y capacidad de aprendizaje para lograr culminar esta etapa de mi vida, además sé que seguirá siendo mi apoyo como profesional.

A mis padres Gladys Rojas y Jaime Mariño por su incondicional apoyo moral, económico, por el amor, comprensión, confianza, consejos, gracias a ellos pude lograr mis metas y ser la persona que soy.

A mi hermana Diana Mariño, por siempre estar cuando más la necesité, por su comprensión, apoyo y consejos, este triunfo es de ella también.

Al profesor Leonardo Cardona que se tomó el tiempo de ayudarnos en el desarrollo de este proyecto de grado, infinitas gracias por ser la ayuda que necesitábamos donde la confusión y las dudas nos invadían.

A mi director de proyecto de grado, a mis maestros que tuve durante el desarrollo de mi vida académica, por todo el conocimiento y apoyo que me brindaron.

A mis amigos, con ellos disfruté mi estadía en la universidad, gracias a los que estuvieron en los buenos momentos y especialmente a los que estuvieron en los malos momentos, siempre estarán presentes en mi mente.

JAIME ALEJANDRO MARIÑO ROJAS

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Armando Muñoz y Marlene Delgado por ser mi motor de vida y ayudar a convertirme en la persona que soy hoy en día.

A mi director de proyecto de grado y profesores de la E3T, que ayudaron a mi formación para alcanzar esta meta en mi vida.

Por último, agradezco al profesor Leonardo Cardona, por su tiempo y su ayuda para lograr realizar este proyecto de grado.

JONATHAN ARMANDO MUÑOZ DELGADO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. METODOLOGÍA	17
1.1 MODELADO EN ATPDRAW.....	17
1.1.1 Modelado de la estructura.....	20
1.1.2 Modelado de los aisladores.	21
1.1.3 Modelado de la línea.....	23
1.1.4 Modelado de los sistemas de puesta a tierra.	24
1.1.5 Modelado del rayo.	28
1.2 OBTENCIÓN DEL BFR	28
1.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	31
2. RESULTADOS	33
2.1 TIERRA SUPLEMENTARIA CON VARILLAS	33
2.2 TIERRA SUPLEMENTARIA CON CONTRAPESOS.....	38
2.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	43
2.3.1 Tierra suplementaria con varillas.	43
2.3.2 Tierra suplementaria con contrapesos.	46
2.3.3 Comparación entre SPT.....	49
3. CONCLUSIONES	50
4. RECOMENDACIONES.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación de un tramo de la línea de transmisión de 230 kV.....	18
Figura 2. Torre de suspensión auto soportada de circuito doble triangular vertical con doble cable de guarda 230 kV.....	19
Figura 3. Modelo para la obtención de corriente crítica por flameo inverso.	20
Figura 4. Modelo de impedancias de la torre doble circuito para ATPDraw.	21
Figura 5. Tensión soportada por los aisladores en el punto crítico de la tensión con corriente de rayo de 1 kA para una longitud de 2 metros y falla a los 0.88 μs	23
Figura 6. Sistema de puesta a tierra con electrodos verticales de tierra suplementaria.	24
Figura 7. Sistema de puesta a tierra compuesta por contrapesos.	26
Figura 8. Tensión en los aisladores con corriente de rayo de 1 kA y falla a los 0.88 μs	30
Figura 9. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de 1 $\Omega.m$	34
Figura 10. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de 100 $\Omega.m$	35
Figura 11. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de 500 $\Omega.m$	36
Figura 12. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de 1000 $\Omega.m$	37
Figura 13. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de 1 $\Omega.m$	39
Figura 14. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de 100 $\Omega.m$	40
Figura 15. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de 500 $\Omega.m$	41

Figura 16. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de 1000 $\Omega.m$	42
Figura 17. Costo de implementar el SPT de tierra suplementaria con varillas para diferentes longitudes, cantidades de varillas y diametro; y costo de las fallas para la resistividad de 500 $\Omega.m$	44
Figura 18. Curva de costos para el SPT de tierra suplementaria con varillas de 4 Eltd de 1/2" para la resistividad de 500 $\Omega.m$, para el primer año de operación.	45
Figura 19. Costo de implementar el SPT de contrapeso con diferentes longitudes, cantidades de cables y profundidades de enterramiento; y costo de las fallas para la resistividad de 500 $\Omega.m$, para el primer año de operación.	47
Figura 20. Curva de costos para el SPT de contrapeso de 1 Ctrp 2/0 AWG y d=0.5 m para la resistividad de 500 $\Omega.m$, para el primer año de operación.	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resistividad por clase de suelo.....	28
Tabla 2. Precios elementos en el mercado para los SPT a febrero de 2019.	32

RESUMEN

TITULO: Simulación de los efectos de los rayos en el índice de fallas de líneas de transmisión utilizando los sistemas de puesta a tierra del estándar IEEE 1243*

AUTORES: JAIME ALEJANDRO MARIÑO ROJAS
JONATHAN ARMANDO MUÑOZ DELGADO**

PALABRAS CLAVES: BFR, Descargas atmosféricas, Software ATP, Tasa de fallas, Sistemas de puesta a tierra, IEEE 1243, Líneas de transmisión

DESCRIPCIÓN:

Las descargas atmosféricas pueden causar fallas permanentes o momentáneas en líneas de transmisión si no cuentan con una protección adecuada y un buen sistema de puesta a tierra para dispersar la energía producida por este fenómeno natural. Este trabajo trata sobre los dos diferentes modelos resistivos de puesta a tierra usados en líneas de transmisión presentados en el estándar IEEE 1243-1997: tierra suplementaria con varillas y con contrapesos. Se analizará el efecto de variar los parámetros internos de cada modelo, que afectan el valor resistivo de puesta a tierra, que a su vez producen una reducción o aumento de la tasa de fallas por flameo inverso por impactos de rayos sobre la torre o el cable de guarda en terrenos con diferentes resistividades. El software ATPDraw se usará para simular las condiciones de la línea y obtener las corrientes críticas que puedan causar sobretensiones que rompan la capacidad de tensión soportada por la cadena de aisladores, para luego con estas encontrar la tasa de fallas por flameo inverso de la línea. El desempeño de cada modelo se comparará de forma técnica y económica. En el último caso se tendrán en cuenta los costos de inversión en el sistema de puesta a tierra y la reducción económica que se obtiene al disminuir la tasa de fallas. Se darán recomendaciones de cual modelo de sistema de puesta a tierra es mejor para ser implementado en diferentes escenarios.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director

ABSTRACT

TITLE: Simulation of the effects of the lightning in the index of faults of transmission lines using the systems of earthing of the standard IEEE 1243^{*}

AUTHORS: JAIME ALEJANDRO MARIÑO ROJAS
JONATHAN ARMANDO MUÑOZ DELGADO**

KEYWORDS: Atmospheric discharges, ATP software, Backflashover rate, Failure rate, Grounding system, IEEE 1243, Transmission lines.

DESCRIPTION:

Atmospheric discharges can cause permanent or momentary failures in transmission lines if they do not have adequate protection and a good grounding system to disperse the energy produced by this natural phenomenon. This work deals with two kind of resistive models for grounding in transmission lines portrayed in the IEEE 1243-1997 Standard: supplemental grounding with rods and supplemental grounding with counterpoises. It is analyzed the effect of varying the internal parameters of each model, which affect the resistive grounding value, which in turn produce a reduction or increase of the backflashover rate due to lightning strikes to the structure or to the ground wire over terrains with several resistivities. It is used the ATPDraw software to simulate the conditions of the line and obtain the critical currents, that may cause surges that break the capacity supported voltage by the chain of insulators, and then to obtain the backflashover rate of the line. The performance of each is compared technically and economically. In the last case, the inversion costs of the grounding system and the economical reduction obtained from decrease the flashover rate. Some recommendations about which system grounding model is better to be implemented will be given for different scenarios.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director

INTRODUCCIÓN

Las descargas atmosféricas son las principales causantes de fallas momentáneas o permanentes en líneas de transmisión, resultando en daños en los equipos conectados, y/o en el sistema eléctrico, generando cuantiosas pérdidas económicas¹. Los reglamentos vigentes como el RETIE o el estándar IEEE 1243-1997 dan una pauta bajo la cual se diseñan los sistemas de puesta a tierra lo cual tiene un impacto importante en la reducción de fallas por descargas atmosféricas. Los rayos más comunes a nivel mundial son los negativos nube-tierra, sin embargo, estudios previos hechos han encontrado que el más común en Colombia corresponde a rayos positivos nube-tierra².

La tasa de fallas por flameo inverso (BFR por sus siglas en inglés) se expresa en unidades de fallas por 100 kilómetro por año, y se producen cuando un rayo impacta la torre o el cable de guarda de una línea de transmisión, provocando una diferencia de potencial lo suficientemente elevada como para exceder el nivel de aislamiento de la línea³. Para lograr que el BFR sea bajo se hace necesario disponer de un buen sistema de puesta a tierra que garantice que la corriente del rayo sea dispersada en el suelo de forma efectiva⁴.

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) ofrecen una variedad de formas en su diseño, los cuales dependen del terreno y de los electrodos a usarse, siendo algunos más

¹ TORRES H., “Los rayos: una visión mitológica, científica y tecnológica”, Ingeniería en investigación, Vol I, pp. 29-34, 1991

² TORRES H., “El espacio y el tiempo en los parámetros del rayo” en *El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, 2ª ed. Bogotá, Colombia: UNIBIBLOS, 2002, cap. 3, pp. 123-131

³ CIGRE working group of lightning, “Guide to the procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”, CIGRE, Paris, Francia, 1991

⁴ HILEMAN A.R., *Insulation coordination for power systems*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1999.

eficientes dependiendo de la situación^{5 6 7}. En algunas estructuras es común encontrar electrodos verticales y contrapesos en los sistemas de puesta a tierra^{8 9}, los cuales tienen construcción y costos diferentes que son factores importantes para tener en cuenta en el diseño.

Para analizar el efecto de los rayos en las estructuras, se tienen en cuenta las ondas viajeras a lo largo del sistema eléctrico y las ondas reflejadas que junto con la cresta de la onda del rayo son determinantes en los picos de tensión vistos en los aisladores^{10 11}. La onda reflejada depende de la velocidad con que esta se desplace, que por lo general está entre el 85% y el 90% de la velocidad de la luz^{12 13}, y del tiempo de viaje de las reflexiones que provienen de la puesta a tierra de la propia torre en la que impacta el rayo y de las tierras de torres adyacentes¹⁴.

La tasa de falla por flameo inverso (BFR por sus siglas en inglés) se ha calculado siguiendo dos metodologías: CIGRÉ¹⁵ e IEEE¹⁶. Ambas tienen diferencias en la distribución de probabilidad de la corriente de rayo, el tiempo de frente de la onda

⁵ CASAS F., *Tierras. Soporte de la seguridad eléctrica*, 3ª ed. Bogotá, Colombia: ICONTEC, 2006

⁶ GATTA F.M., GERI A., LAURIA S. y MACCIONI M., "Backflashover simulation of HV transmission lines with enhanced counterpoise groundings", *Electric Power System Research*, vol. 79, pp. 1076-1084, 2009

⁷ CHISHOLM W. A. y JANISCHEWSKYJ W., "Lightning surge response of ground electrodes", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1329-1337, Abr. 1989

⁸ HILEMAN A.R., Op. Cit.

⁹ IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines, IEEE Standard 1243, 1997

¹⁰ MARTINEZ J.A. y CASTRO-ARANDA F., "Lightning performance of transmission lines using the EMTP", *IEEE Power engineering society general meeting (IEEE Cat. No 03CH37491)*, Toronto, Ontario, Canadá, 2003, pp. 295-300

¹¹ DUDURYCH I.M., GALLAGHER T.J., CORBETT J. y ESCUDERO M.V., "EMTP analysis of the lightning performance of HV transmission line", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distribu*, vol. 150, no. 4, pp. 501-506, Jul. 2003

¹² HILEMAN A.R., Op. Cit.

¹³ IEEE Op. Cit.

¹⁴ KADIR MZA. AB. y COTTON I., "Implementation of the modified leader progression model in backflashover analysis", *IEEE International power and energy conference*, Putra Jaya, Malasia, 2006, pp. 516-521

¹⁵ HILEMAN A.R., Op. Cit.

¹⁶ IEEE Op. Cit.

de corriente o los tiempos en los que se compara la tensión en el aislador, entre otras. En general las dos metodologías coinciden en estimar de forma analítica el efecto transitorio de las puestas a tierra de la torre impactada y las adyacentes en las tensiones que se presentan en la torre y en la cadena de aisladores. Esto lleva a simplificaciones que se pueden evitar simulando de forma directa todo el sistema de transmisión en un programa de análisis transitorio como ATP o EMTP, según se muestra en diferentes trabajos^{17 18 19 20 21 22 23}. En este trabajo, se simularán los modelos de resistencia de sistemas de puesta a tierra propuestos en el estándar IEEE 1243-1997: tierra suplementaria con varillas y con contrapesos en el desempeño de una línea de transmisión de 230 kV ante rayos, para diferentes valores de conductividad haciendo uso del software ATPDraw (software libre), lo cual permitirá obtener resultados más realistas en contraste con los métodos tradicionales (CIGRÉ e IEEE)^{24 25 26}. De esta manera se recomienda el SPT más adecuado ante descargas atmosféricas de forma técnica y luego de forma económica, teniendo en cuenta los costos de inversión en materiales y construcción del SPT.

¹⁷ MARTINEZ J.A. y CASTRO-ARANDA F., Op. Cit.

¹⁸ DUDURYCH I.M., GALLAGHER T.J., CORBETT J. y ESCUDERO M.V., Op. Cit.

¹⁹ KADIR MZA. AB. y COTTON I., Op. Cit.

²⁰ HUSSEIN, HUSSEIN & CHOMBO, PIUS VICTOR & MARUNGSRI, BOONRUANG. Flashover and Back-Flashover Analysis with Lightning Strokes of 69 kV and 24 kV Lines in Thailand Using ATP/EMTP. International Journal on Energy Conversion (IRECON). 6. 111-121. 10.15866/irecon.v6i4.15253. 2018

²¹ MARUNGSRI B., BOONPOKE S., RAWANGPAI A., OONSIVILAI A., KRITAYAKORNUPONG C.. Study of Tower Grounding Resistance Effected Back Flashover to 500 kV Transmission Line in Thailand by using ATP/EMTP. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol:2, No:6, 2008

²² ABD-ALLAH M. A., ELYAN T. and BELAL Eman. Back flashover Analysis for Egyptian 500kV and 220kV Transmission towers. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 6, Issue 4, April 2016 289 ISSN 2250-3153

²³ GATTA F.M., GERI A. y LAURIA S., "Backflashover simulation of HV transmission lines with concentrated tower grounding", Electric Power System Research, vol. 73, pp. 373-381, 2005

²⁴ HILEMAN A.R., Op. Cit.

²⁵ HUSSEIN, HUSSEIN & CHOMBO, PIUS VICTOR & MARUNGSRI, BOONRUANG. Op. Cit.

²⁶ MARUNGSRI B., BOONPOKE S., RAWANGPAI A., OONSIVILAI A., KRITAYAKORNUPONG C.. Op. Cit.

Este documento está dividido en cuatro secciones principales, las cuales son la metodología (sección 2), donde se presentan los modelos empleados del sistema eléctrico en ATPDraw, cómo obtener el BFR en cada caso y cómo se realizará el análisis económico; los resultados (sección 3), en donde se exponen los resultados obtenidos del BFR para cada SPT y se presentan cifras económicas de estos para cada escenario propuesto; finalmente se dan recomendaciones y conclusiones del estudio hecho (sección 4).

1. METODOLOGÍA

1.1 MODELADO EN ATPDRAW

El sistema a analizar está compuesto por tres torres y una línea larga en sus extremos (Figura 1), cada una de suspensión auto soportada de circuito doble triangular vertical, con doble cable de guarda, una altura total de 48,6 m, un ancho de 13,6 m y una tensión de servicio de 230 kV (Figura 2). La torre central será el punto de análisis del comportamiento ante una descarga atmosférica, por lo cual, se representa la impedancia característica de cada sección de la estructura, que son el cuerpo y los brazos o crucetas en donde se encuentran los aisladores, los cuales son el punto donde se presentará el flameo. Las torres adyacentes están separadas 500 m y se diseñan de forma simplificada como una sola impedancia característica que representa la estructura total de la torre. En estas se reflejan las ondas viajeras que recorren el cable de guarda y las estructuras cercanas, las cuales son de vital importancia en la tensión vista en los aisladores²⁷. Las dos torres en los extremos se ubican a 2.5 km del sistema a analizar y las reflexiones de las ondas en estas torres llegan en un rango de tiempo que no influye en la tensión vista en los aisladores de la torre impactada.

²⁷ HILEMAN A.R., Op. Cit.

Figura 1. Representación de un tramo de la línea de transmisión de 230 kV.

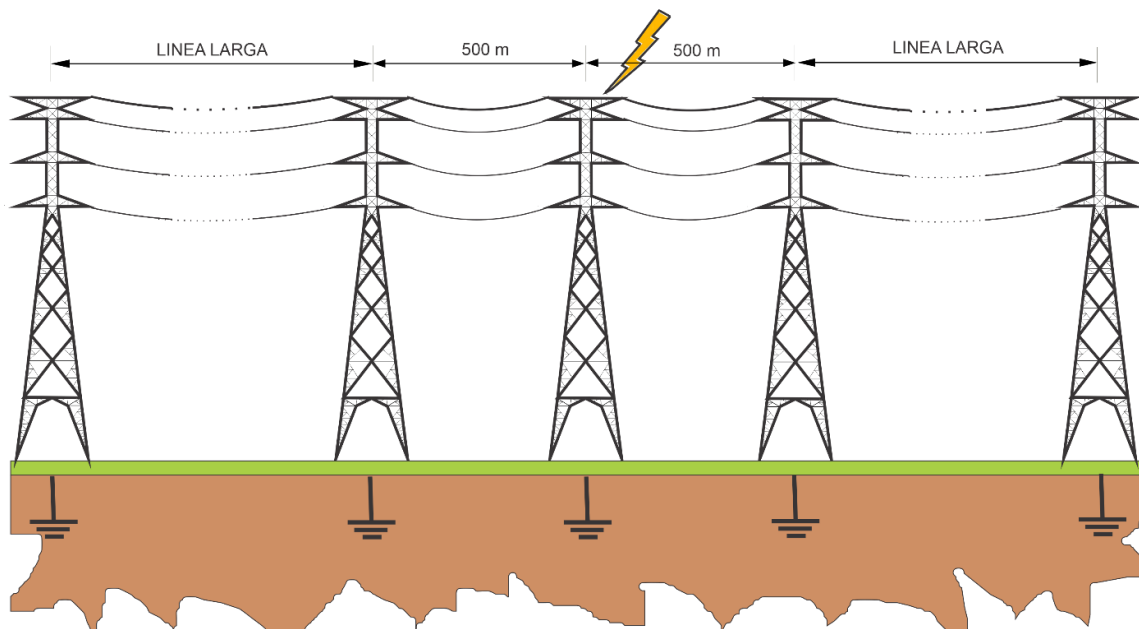
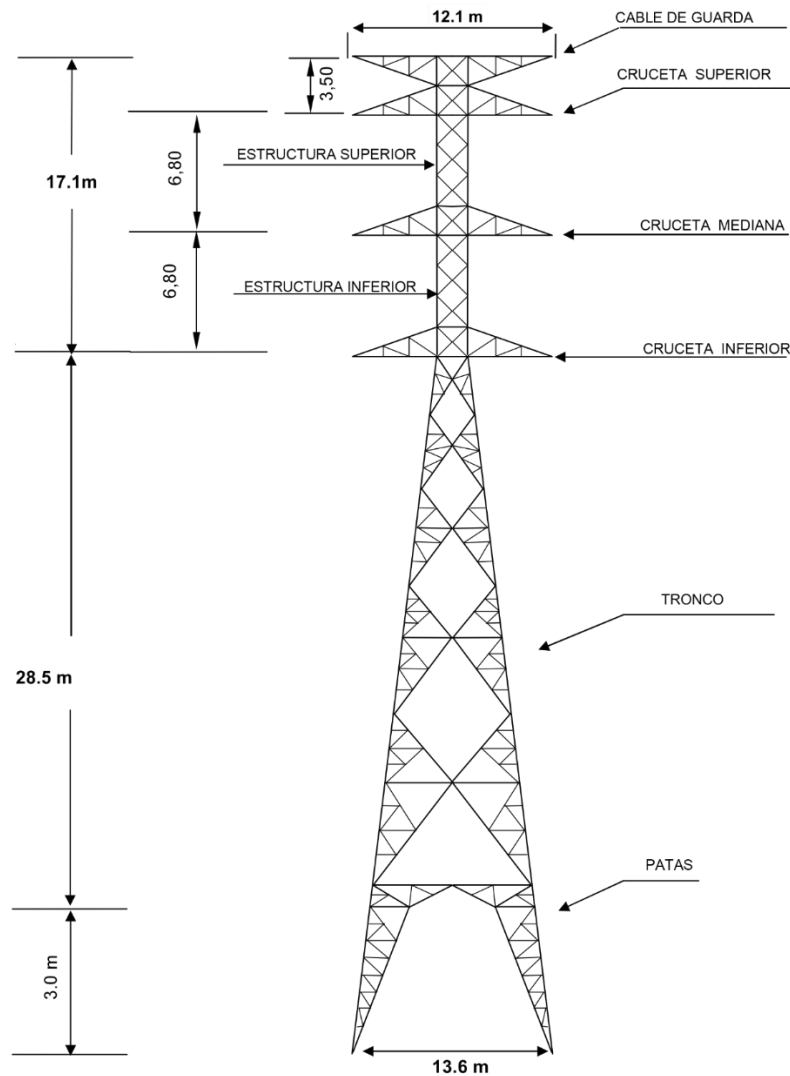
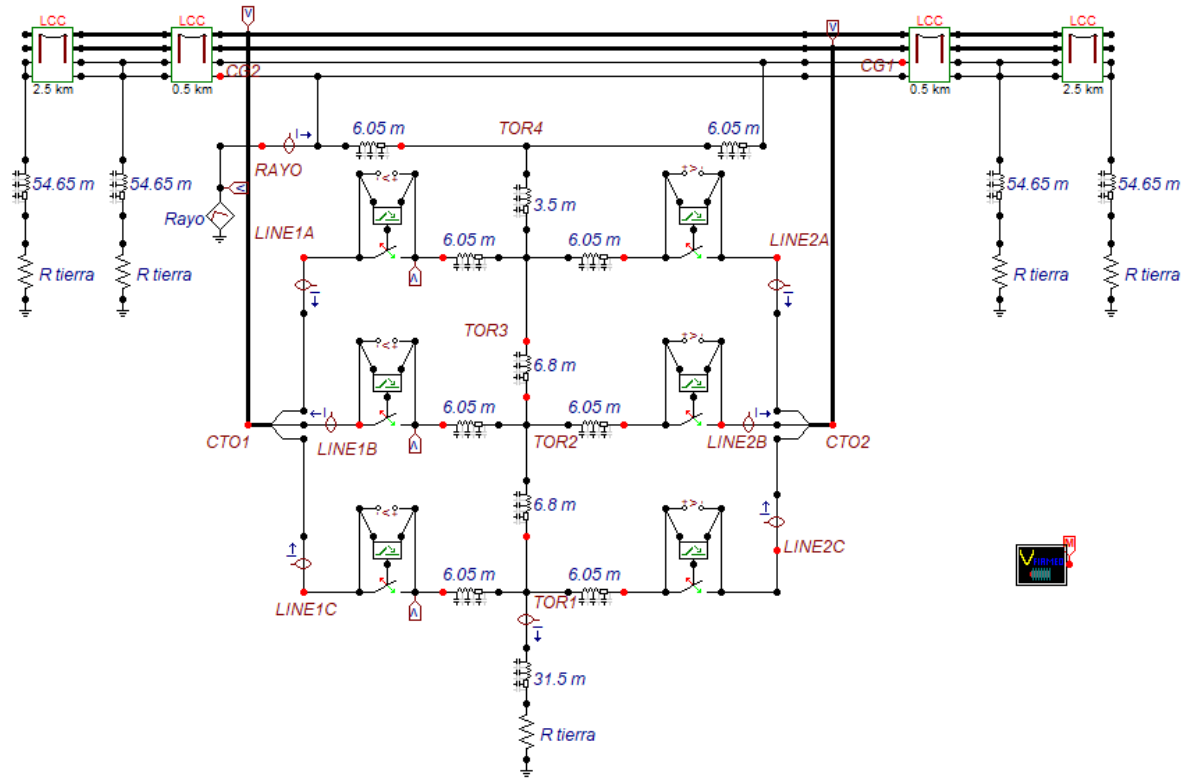


Figura 2. Torre de suspensión auto soportada de circuito doble triangular vertical con doble cable de guarda 230 kV.



Para modelar en ATPDraw el tramo descrito del sistema de transmisión de 230 kV (Figura 1), se tienen en cuenta la estructura, los aisladores, la línea, los sistemas de puesta tierra y el rayo, los cuales se representan con diferentes herramientas del software (Figura 3).

Figura 3. Modelo para la obtención de corriente crítica por flameo inverso.



1.1.1 Modelado de la estructura. Los datos de la estructura de 230 kV (Figura 2) se modelan en ATPDraw con impedancias características utilizando la herramienta “LINE_ZT” con sus respectivas distancias y con una velocidad de propagación de la onda del 90% de la velocidad de la luz^{28 29}, estando representadas por secciones de la estructura que tienen asociadas impedancias características (Figura 4). Para obtener sus valores, se utiliza el modelo Sargent-Darveniza para estructuras cónicas (Ec. 1)^{30 31}.

$$Z_T = 30 * \ln \left(\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (1)$$

²⁸ Ibíd.

²⁹ MARUNGSRI B., BOONPOKE S., RAWANGPAI A., OONSIVILAI A., KRITAYAKORNUPONG C.. Op. Cit.

³⁰ CIGRE Op. Cit.

³¹ ABD-ALLAH M. A., ELYAN T. and BELAL Eman. Op. Cit.

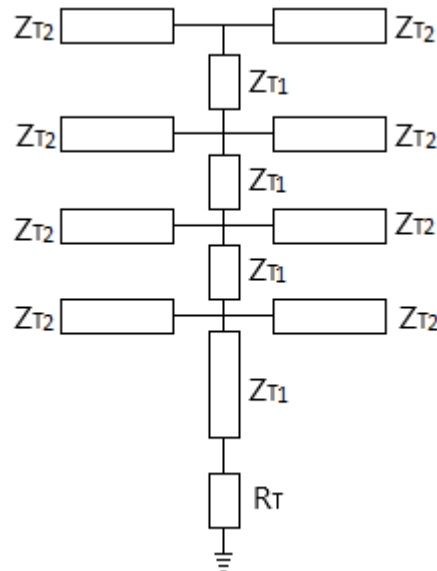
Donde,

h es la altura de la torre o del cono en $[m]$;

r es el radio de base de la torre o del cono en $[m]$.

Z_{T1} representa la impedancia característica de la parte central vertical de la estructura compuesta por las patas, el tronco, la estructura inferior y la estructura superior; Z_{T2} representa la impedancia característica de cada una de las crucetas de la torre (Figura 2); y R_T representa la resistencia de puesta a tierra (Figura 4).

Figura 4. Modelo de impedancias de la torre doble circuito para ATPDraw.



Para el modelo se obtiene que la impedancia del tronco de la torre es $Z_{T1} = 139.09 \Omega$ y la impedancia de los brazos o crucetas de la torre es $Z_{T2} = 97.17 \Omega$ de acuerdo con la Ec. 1.

1.1.2 Modelado de los aisladores. Un aislador tiene un comportamiento no lineal ante impulsos atmosféricos, por tanto, la tensión soportada por una cadena de aisladores se representa en una curva dependiente del tiempo y de la longitud de la

cadena compuesta por discos (Ec. 2)³². Esta curva propuesta por el CIGRÉ³³ es un indicador de flameo si es excedida por la tensión vista en los aisladores al caer un rayo. En ATPDraw este modelo de aislador se integró en el software mediante la herramienta “model” para diseñar la curva de tensión del aislador y “switch” para que sea el que actúe como interruptor ante un flameo utilizando la curva generada por el “model”³⁴.

$$V_{ImpulseFlashover}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right) W \quad (2)$$

Donde,

V es la tensión necesaria para que se presente flameo en $[kV]$;

t es la duración del flameo en $[\mu s]$ para $(0.5 \mu s - 16 \mu s)$;

W es la longitud de los aisladores en $[m]$.

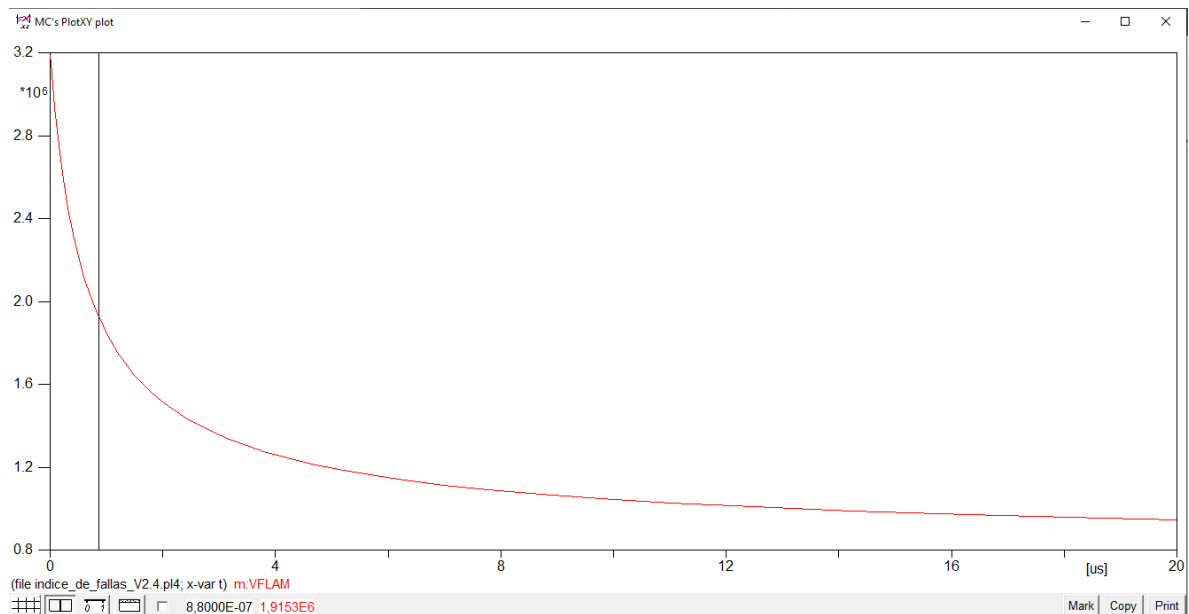
Para modelar la curva en ATPDraw, se utilizó una longitud de la cadena de aisladores de 2 metros, de acuerdo a lo establecido en IEEE 1243-1997 para 230 kV , obteniendo así la Figura 5.

³² IEEE Op. Cit.

³³ AVILA I. L., DI MAURO G.F. Y SUÁREZ J.A., “Estudio de los efectos de las descargas atmosféricas sobre la confiabilidad de las líneas aéreas de transporte de energía”, III congreso de las américas de distribución eléctrica, Ciudad de Córdoba, Argentina, 2016

³⁴ GATTA F.M., GERI A. y LAURIA S., Op. Cit.

Figura 5. Tensión soportada por los aisladores en el punto crítico de la tensión con corriente de rayo de 1 kA para una longitud de 2 metros y falla a los 0.88 μs .



1.1.3 Modelado de la línea. Para la línea se utiliza un cable de fase tipo FLINT AAAC con resistencia de $0.089 \Omega/km$ y 2.52 cm de diámetro, con un cable de guarda tipo Alumoweld 7 No. 9 AWG con resistencia de $1.844 \Omega/km$ y 8.71 mm de diámetro. En ATPDraw se utiliza la herramienta “LCC”, en la que se selecciona el modelo Bergeron para parámetros distribuidos de la línea, y toma como otros parámetros la resistividad del terreno que varía dependiendo del tipo de suelo (Tabla 1), y la frecuencia a la cual viaja la onda es a 100 kHz ; se asume un vano de 500 m para las torres adyacentes, las cuales se tienen en cuenta para las reflexiones de onda debidas al impacto del rayo, y de 2.5 km para representar una línea larga, en la cual las reflexiones sobrepasan el tiempo de los $20 \mu s$, a un 90% de la velocidad de la luz ^{35 36}, las cuales no entran a alterar los datos de la simulación.

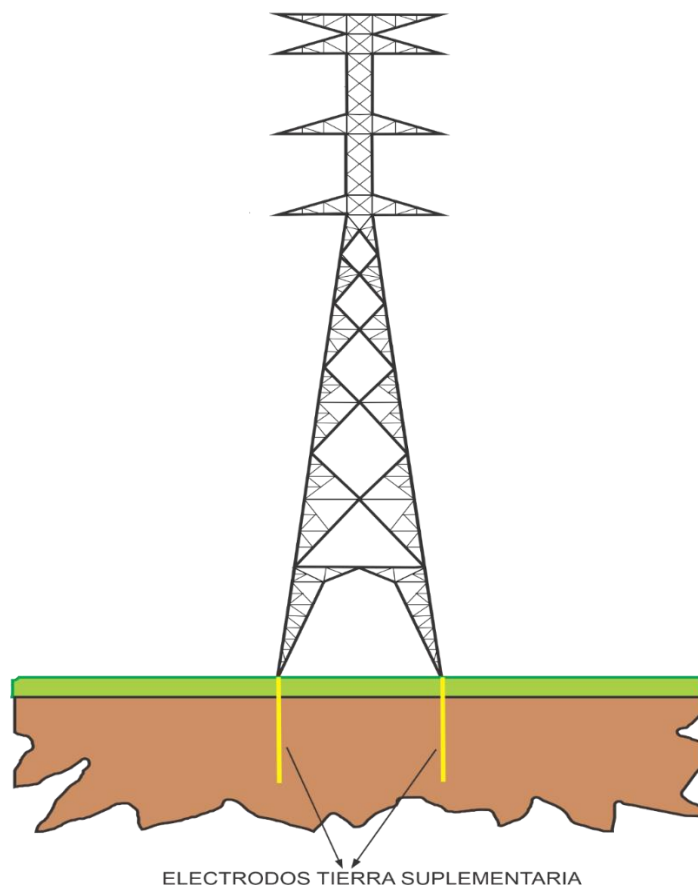
³⁵ HILEMAN A.R., Op. Cit.

³⁶ MARUNGSRI B., BOONPOKE S., RAWANGPAI A., OONSIVILAI A., KRITAYAKORNUPONG C.. Op. Cit.

1.1.4 Modelado de los sistemas de puesta a tierra. En el estándar IEEE 1243-1997³⁷ se describen matemáticamente los sistemas de puesta a tierra (Ec. 3) (Ec. 4) y son representados en el software ATPDraw con un valor resistivo:

- *Tierra suplementaria con varillas:* Son varillas de cobre o aleaciones de este que hacen contacto con el terreno, dispuestas de forma vertical (Figura 6) cuyos parámetros son resistividad, radio, profundidad de enterramiento y número de electrodos que conforman el sistema de puesta a tierra (Ec. 3)³⁸.

Figura 6. Sistema de puesta a tierra con electrodos verticales de tierra suplementaria.



³⁷ IEEE Op. Cit.

³⁸ Ibíd.

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \ln \left(\frac{2s}{r} \right) \quad (3)$$

Donde,

R es la resistencia [Ω];

ρ es la resistividad del suelo [$\Omega \cdot m$];

s es la longitud de la varilla en contacto con la tierra [m];

r es el radio de la varilla [m].

De acuerdo a la normativa colombiana la longitud del electrodo mínima es de 2.4 m , sin embargo, en el mercado existen varillas de otras medidas que se pueden unir hasta lograr la longitud deseada del electrodo, no obstante, para poder tener una cantidad de datos considerables y apreciables, se utilizarán varillas de cobre de 1.8 m de longitud hasta llegar a una profundidad de enterramiento de 10.8 m , siendo la unión de 6 varillas en serie utilizando uniones mecánicas y soldadura exotérmica hasta completar aproximadamente 10 m de longitud que es el valor máximo, basado en recomendaciones prácticas³⁹; para 3 radios de varilla distintos aceptados en la normativa colombiana que son 1/2", 9/16" y 5/8" de diámetro⁴⁰; y con 2, 4 y 8 varillas dispuestas en forma paralela, cuya resistencia se calcula de acuerdo al equivalente de resistencias en paralelo, siempre que la distancia entre electrodos sea más del doble del enterramiento^{41 42}, como por ejemplo en el caso de 2 electrodos la resistencia equivalente es la mitad de la resistencia obtenida con un solo electrodo, de acuerdo a la ley de Ohm y las leyes de Kirchoff.

Para un SPT con una resistividad de 100 $\Omega \cdot m$, dos electrodos de longitud de 7.2 m y 5/8" de diámetro, la resistencia (Ec. 3) es 8.29 Ω aproximadamente.

³⁹ CASAS F., Op. Cit.

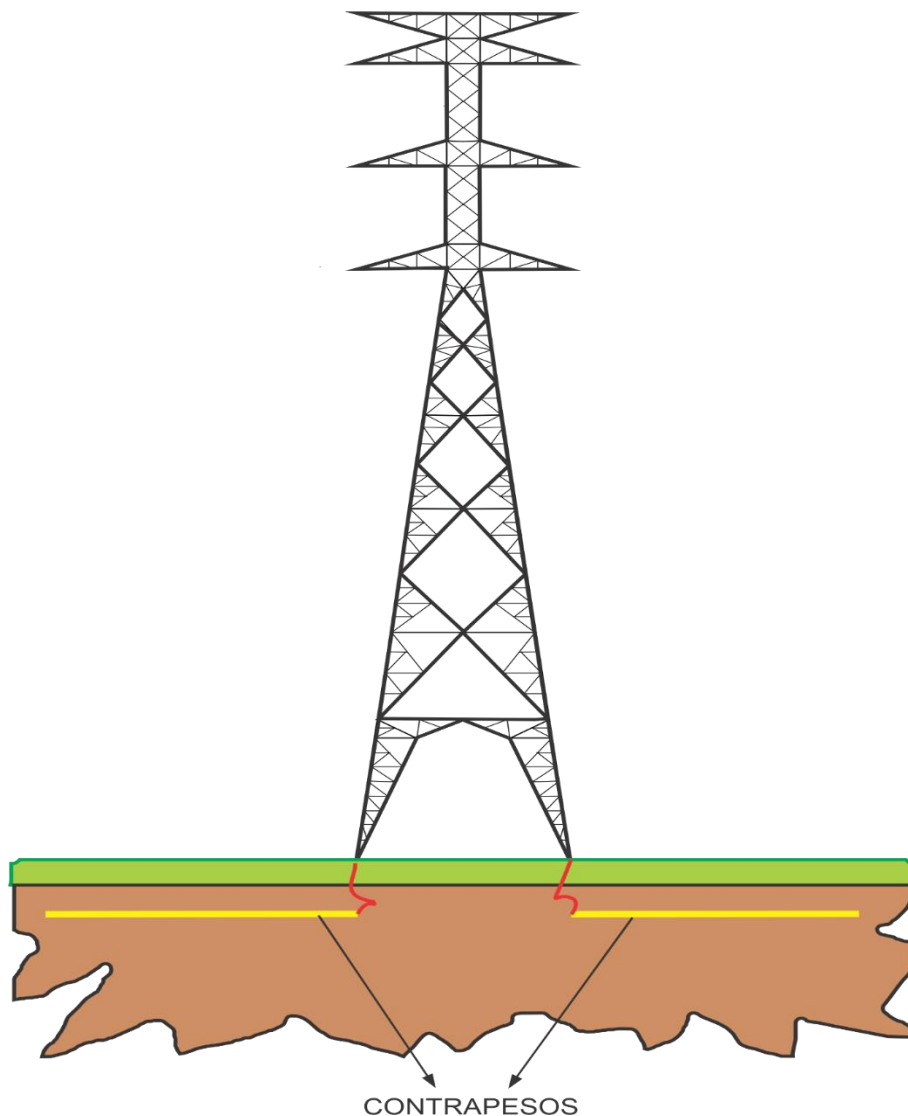
⁴⁰ DARVENIZA M., POPOLANSKY F., y WHITEHEAD E. R., "Lightning protection of UHV transmission lines", Electra, no. 41, pp. 39–69, 1975

⁴¹ HILEMAN A.R., Op. Cit.

⁴² CASAS F., Op. Cit.

- *Tierra suplementaria con contrapesos*: Está compuesto por cables de cobre o ACSR desnudos tendidos de forma horizontal y paralela a los conductores de fase a lo largo de la línea de transmisión (Figura 7), cuyos parámetros son la resistividad, radio, profundidad de enterramiento, longitud y número de cables que conforman el sistema de puesta a tierra de contrapeso (Ec. 4)⁴³.

Figura 7. Sistema de puesta a tierra compuesta por contrapesos.



⁴³ IEEE Op. Cit.

$$R = \frac{\rho}{\pi s} \left(\ln \left(\frac{2s}{\sqrt{4rd}} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

Donde,

R es la resistencia [Ω];

r es el radio del cable [m];

d es la profundidad de enterramiento [m];

s es la longitud del contrapeso [m].

ρ es la resistividad del suelo [$\Omega \cdot m$];

Para el modelo de contrapeso se utilizarán 1 y 2 cables de cobre como contrapesos, con profundidades de enterramiento de 0.5 y 1.5 m ; calibres de 2/0 y 4/0 AWG; y longitudes de 10 hasta 100 m , de acuerdo con lo dispuesto en la IEEE 1243-1997.

La resistencia de éste SPT teniendo una resistividad de 500 $\Omega \cdot m$, un contrapeso, cable de cobre desnudo 2/0 AWG, con una longitud de 70 metros y enterrado a una profundidad de 0.5 m , la resistencia (Ec. 4) es 14.13 Ω , en caso de que sean dos contrapesos, despreciando los efectos de ionización del suelo y de mutuo resistencia entre los cables, tenemos aproximadamente una resistencia de 7.1 Ω .

El suelo tiene diferentes características que afectan la capacidad de conducir electricidad, como la humedad, composición química, compactación del material, concentración de sales, temperatura, entre otros; por tanto, los terrenos no tienen una resistividad homogénea ya que cada punto del terreno tiene características diferentes, sin embargo, se pueden clasificar entre un rango de valores que permiten determinar el tipo de terreno como se muestra en la (Tabla 1)^{44 45}, y para determinar estos valores se usa un equipo de medición llamado telurómetro.

⁴⁴ HILEMAN A.R., Op. Cit.

⁴⁵ SARGENT M.A. y DARVENIZA M., "Tower surge impedance", IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. pas-88, no. 5, pp. 680-687, May 1969.

Tabla 1. Resistividad por clase de suelo.

Clase de suelo	Resistividad [$\Omega.m$]
Clase A: Blandos ácidos	Menor a 200
Clase B1: Arenosos semisecos	Entre 500 y 1000
Clase B2: Arenosos secos	Entre 1000 y 2000
Clase C1: Rocosos	Menor a 1000
Clase C2: Rocosos	Mayor a 1000

Fuente: CASAS F., Tierras. Soporte de la seguridad eléctrica, 3ª ed. Bogotá, Colombia: ICONTEC, 2006

Para facilitar el análisis y poder emplear los modelos matemáticos del estándar IEEE 1243, se trabaja con una resistividad homogénea en todo el terreno, correspondiente a 4 tipos de suelos, con resistividades de 1, 100, 500 y 1000 $\Omega.m$.

1.1.5 Modelado del rayo. La fuente del rayo que se utiliza en ATPDraw es una “Slope-Ramp type 13”, la cual se une a la torre para simular el impacto en la misma, teniendo una forma de onda $1.2/50 \mu s^{46}$, de amplitud máxima de 1 kA, siendo este valor de amplitud escalable hasta el valor necesario para superar la tensión de aislamiento del aislador.

1.2 OBTENCIÓN DEL BFR

La tasa de fallas por flameo inverso también conocida por siglas en inglés BFR o BFOR indica el número de fallas por impactos directos sobre la torre o el hilo de guarda que producen flameos (Ec. 5). La expresión del BFR considera que, de todos los impactos directos, los de la torre son los que pueden producir flameo en mayor medida y los estima en un 60%^{47 48}:

⁴⁶ HILEMAN A.R., Op. Cit.

⁴⁷ CIGRE Op. Cit.

⁴⁸ HILEMAN A.R., Op. Cit.

$$BFR = 0.6 N_L P(I_C) \quad (5)$$

Donde,

N_L es la cantidad de rayos que impactan la estructura [*impactos/100km/año*] (Ec. 6)^{49 50};

$P(I_C)$ es la probabilidad de que la corriente I_C sea excedida (Ec. 7)^{51 52}.

$$N_L = N_g \left(\frac{28 h^{0.6} + S_g}{10} \right) \quad (6)$$

Donde,

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

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

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

$$P(I_C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_C}{31} \right)^{2.6}} \quad (7)$$

Donde,

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

Como un ejemplo de un SPT de tierra suplementaria con varillas, resistividad de 100 $\Omega.m$, dos electrodos de longitud de 7.2 m y 5/8" de diámetro; la resistencia

⁴⁹ HILEMAN A.R., Op. Cit.

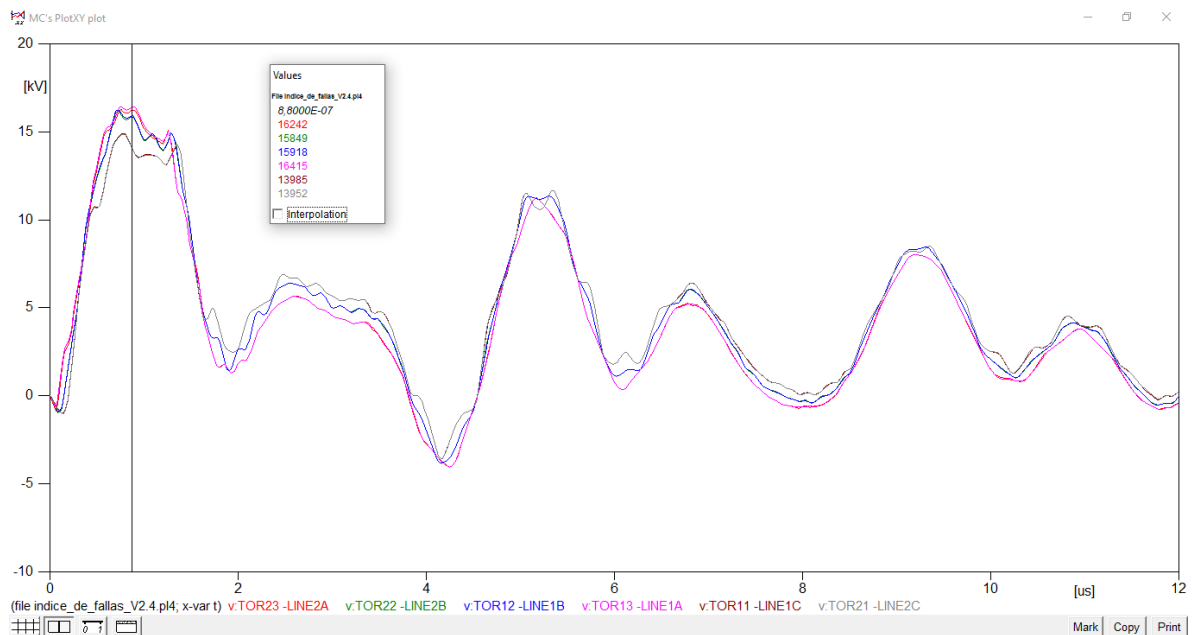
⁵⁰ GATTA F.M., GERI A. y LAURIA S., Op. Cit.

⁵¹ CIGRE Op. Cit.

⁵² HILEMAN A.R., Op. Cit.

(Ec. 3) es 8.29Ω . Al modelar la línea en ATPDraw (Figura 3), se procede a modificar los valores de los elementos de resistencia de tierra ($R_{\text{tierra}}=8.29 \Omega$) y los valores de resistividad dentro de la herramienta “LCC” en $100 \Omega.m$, para luego simular y ver las diferentes tensiones entre cada fase y la estructura, en las cuales se busca el punto de tensión más elevado y el tiempo en el que se produce al aplicar una corriente de rayo como la descrita en la sección 2.1.5 (Figura 8), la cual es la responsable de que se produzca flameo y corresponde a 16.4 kV en un tiempo de $0.88 \mu\text{s}$, luego, con este tiempo se busca el punto de intersección en la curva de tensión soportada por los aisladores (Figura 5) y corresponde a 1.91 MV . La división entre estos dos valores permite obtener la corriente crítica que es de 116.6 kA (Ec. 8), y a su vez la probabilidad de que la corriente produzca un flameo (Ec. 7), siendo esta de 3.09% . Posteriormente, teniendo en cuenta una densidad de rayos en la zona de $1 \text{ rayo}/\text{km}^2/\text{año}$, se obtiene la cantidad de rayos que impactan la estructura (Ec. 6) que es $29.99 \text{ rayos}/\text{km}^2/\text{año}$, y con estos valores en la (Ec. 5) se obtiene el BFR de 0.6 aproximadamente.

Figura 8. Tensión en los aisladores con corriente de rayo de 1 kA y falla a los $0.88 \mu\text{s}$.



$$I_C = \frac{1,915 [MV]}{16,42 [kV/kA]} = 116,6 [kA] \quad (8)$$

Para determinar el valor del BFR se usa la Ec. 5, en la cual se puede observar que el resultado está relacionado con los cambios de resistencia del SPT, pues el valor de $P(I_C)$ depende de la corriente crítica de cada evento, y entre menor sea el valor de resistencia a tierra mayor corriente crítica va a ser necesaria para provocar la falla, por lo que entre más alta sea dicha corriente menor va a ser la probabilidad de que ésta ocurra, por tanto, el valor del BFR será bajo, y un valor bajo es lo que se busca pues indica pocas fallas en el transcurso de un año.

1.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para realizar la comparación económica entre los dos sistemas presentados en el documento, se toman los precios unitarios de los materiales utilizados para la construcción de cada SPT y se multiplican por la cantidad empleada en los mismos. Además, se le adiciona el costo que supone construirlos, y con estos resultados se presentan unas gráficas donde se visualizan los costos de construcción tanto para tierra suplementaria con varillas como con contrapesos, con las cuales se analiza su viabilidad económica, teniendo como referencia el rendimiento de los SPT ante descargas atmosféricas.

Esta comparación se realiza para cada sistema, teniendo en cuenta el rendimiento eléctrico, es decir, observando el comportamiento del BFR, al cambiar los valores en las variables de tierra suplementaria con varillas de acuerdo con la (Ec. 3) o con contrapeso de acuerdo con la (Ec. 4). De esta manera se analiza el costo/beneficio para así poder recomendar el SPT con un BFR bajo y con el menor precio.

En el mercado se encontraron los precios de los elementos necesarios para construir los SPT (Tabla 2), adicional a un valor de mano de obra de la cuadrilla por hora de 22.000 \$COP para la construcción del SPT, lo cual incluye la excavación, enterramiento del cable o varilla, soldadura, tendido del cable y anclaje a la estructura.

Tabla 2. Precios elementos en el mercado para los SPT a febrero de 2019.

Precio varillas de 1.8 [m] [\$COP]			Precio de cables [\$COP]		Precio soldadura exotérmica 250 gr [\$COP]	Precio moldes [\$COP]	Precio de la caja de paso [\$COP]	Precio conector [\$COP]	
5/8"	9/16"	1/2"	2/0 AWG	4/0 AWG				2/0 AWG	4/0 AWG
\$134.233	\$125.000	\$108.500	\$23.671	\$37.431	\$ 29.950	\$129.650	\$76.950	\$4.500	\$ 7.400

Un ejemplo es la construcción de un SPT de tierra suplementaria con varillas compuesta de 2 electrodos de cobre de 5/8" con una longitud de enterramiento de 3.6 m, la cual necesita de 4 conectores 2/0 AWG para anclarse a cada pata de la torre, 60 m de cable de cobre desnudo 2/0 AWG para equipotencializar, 2 cajas de paso para los dos electrodos a enterrar, 4 varillas de 5/8" de 1.8 m cada una, 1 molde para soldar dos varillas en serie de 1.8 m, 1 molde para soldar el cable y el electrodo, soldadura exotérmica, y 6 horas de mano de obra arroja un valor de \$ 2'550.355 \$COP.

2. RESULTADOS

En esta sección se analiza el BFR para configuraciones de SPT de Tierra complementaria y contrapesos para resistividades del suelo constantes de 1, 100, 500 y 1000 $\Omega.m$. En cada caso, se utilizaron longitudes y diámetros de electrodos de acuerdo con lo establecido en la normativa Colombiana NTC 2206, el RETIE y la IEEE 1243-1997. La normativa colombiana especifica 20 Ω como máxima resistencia permitida para estructuras⁵³, sin embargo, para efectos de estudio y comparación, se utilizaron datos de resistencia mayores a la norma.

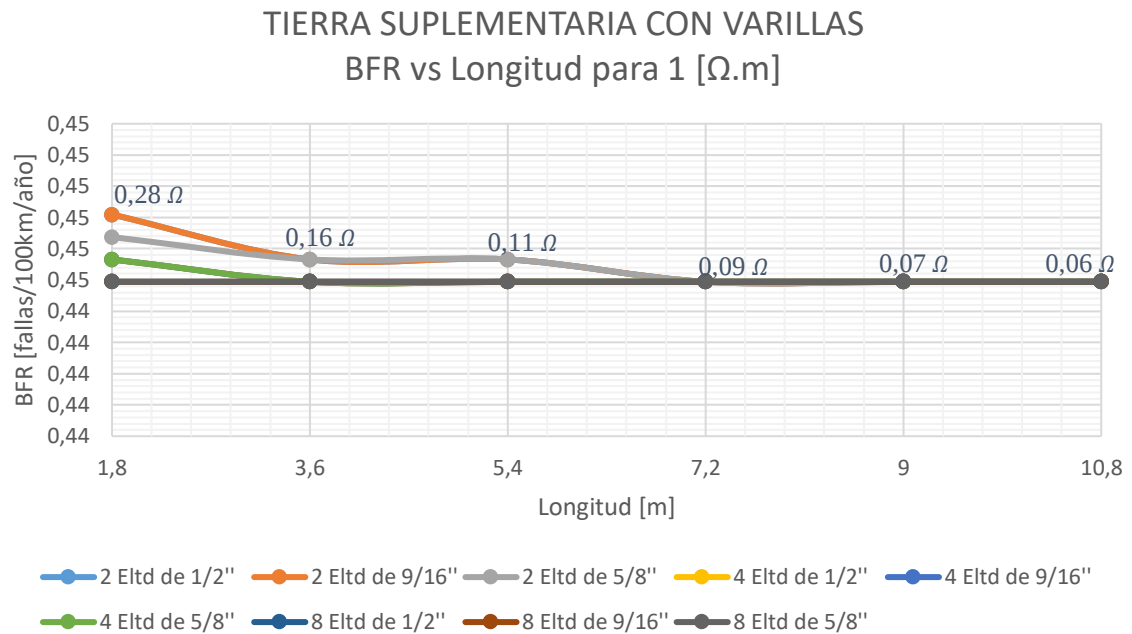
2.1 TIERRA SUPLEMENTARIA CON VARILLAS

En las figuras 9, 10, 11 y 12 se muestra el BFR en función de las longitudes de los diferentes electrodos (Eltd) usados para tierra suplementaria para los distintos escenarios de resistividades propuestos. También se muestra la resistencia asociada a cada punto en la curva de mayor valor de BFR. Así, cada figura indica el desempeño de las configuraciones del SPT de tierra suplementaria con varillas ante descargas atmosféricas.

En la Figura 9, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud de enterramiento de los electrodos en un suelo con resistividad de 1 $\Omega.m$, en donde además se variaron el radio y la cantidad de los electrodos. En este escenario el cambio de dichos parámetros no representa una variación significativa del BFR.

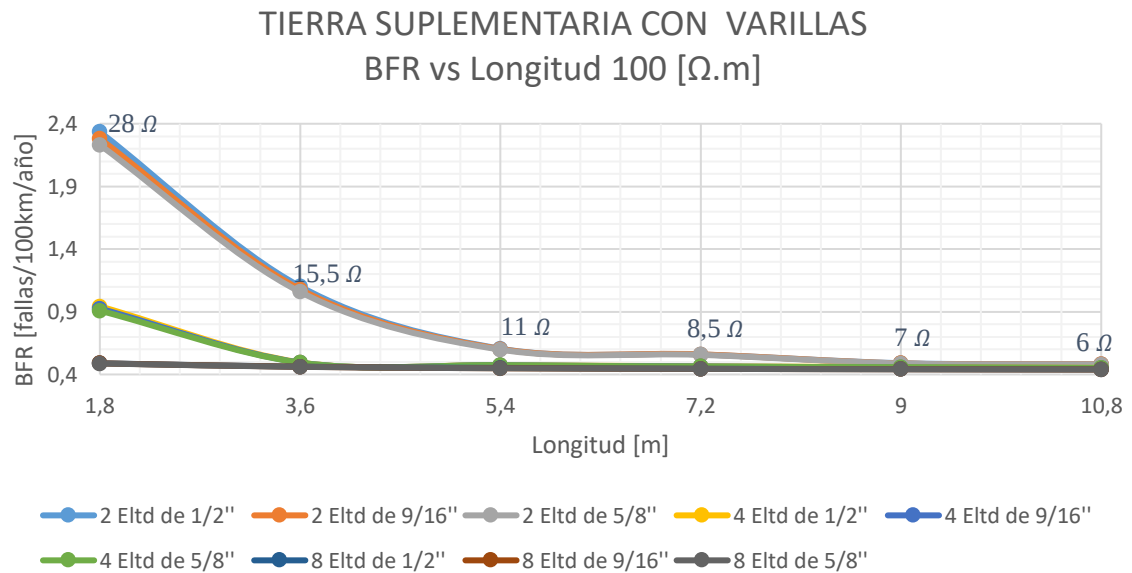
⁵³ IEEE working group report, "Estimating lightning performance of transmission lines II – Updates to analytical models", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, no.3, pp. 1254-1267, Jul. 1993

Figura 9. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de $1 \Omega.m$.



En la Figura 10, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud de enterramiento de los electrodos en un suelo con resistividad de $100 \Omega.m$; además se varió el radio y la cantidad de los electrodos. En este escenario se aprecia que el valor más alto del BFR es de $2.3 \text{ fallas}/100\text{km}/\text{año}$, correspondiente a 2 electrodos y 1.8 m de longitud; al utilizar 4 electrodos se reduce el BFR en un 61% y con 8 electrodos en un 83%. Para una longitud de 3.6 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 54% y con 4 u 8 electrodos en un 83%. Para una longitud de 5.4 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 75% y con 4 u 8 electrodos en un 83%; siendo el mismo comportamiento para 7.2 m . Para una longitud de 9 m o superior, se logra una máxima reducción del 83% utilizando 2, 4 u 8 electrodos, observándose que a partir de este punto no existe variación apreciable del BFR.

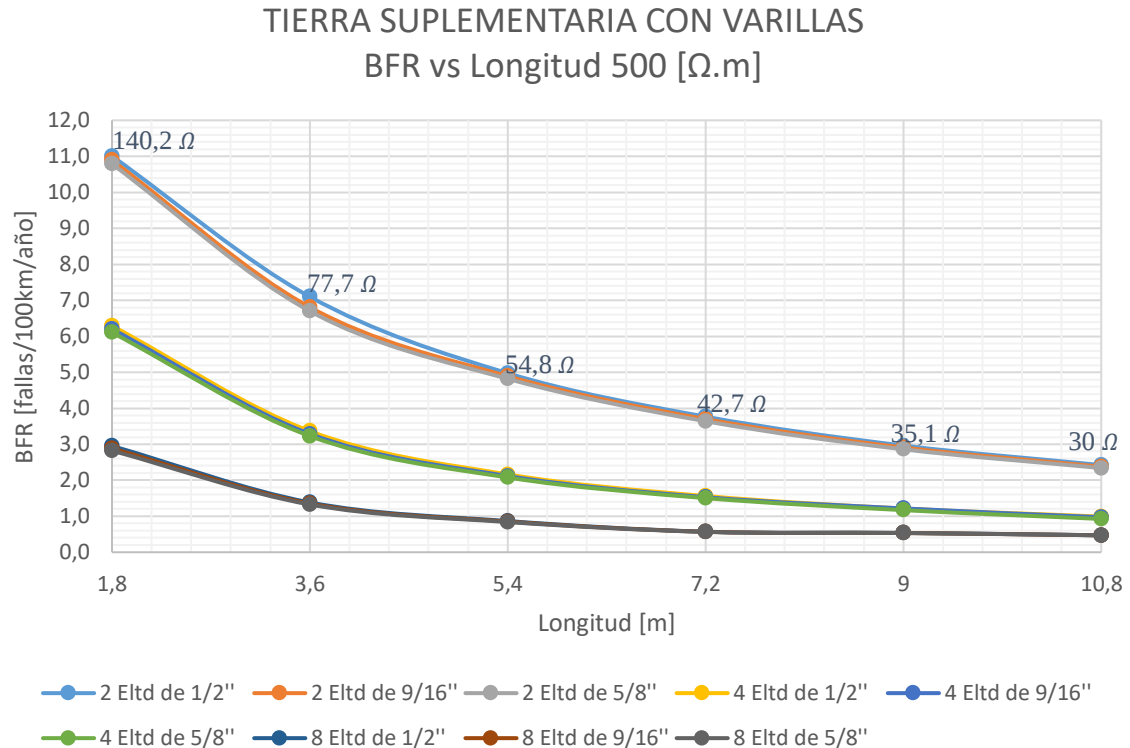
Figura 10. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de $100 \Omega.m$.



En la Figura 11, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud de enterramiento de los electrodos en un suelo con resistividad de $500 \Omega.m$, variando además el radio y la cantidad de los electrodos. En este escenario se aprecia que el valor más alto del BFR es de $10.8 \text{ fallas}/100\text{km}/\text{año}$, correspondiente a 2 electrodos y 1.8 m de longitud; al utilizar 4 electrodos se reduce el BFR en un 44% y con 8 electrodos en un 74%. Para una longitud de 3.6 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 36%, con 4 electrodos en un 70% y con 8 electrodos en un 88%. Para una longitud de 5.4 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 56%, con 4 electrodos en un 81% y con 8 electrodos en un 93%. Para una longitud de 7.2 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 67%, con 4 electrodos en un 86% y con 8 electrodos en un 94%. Para una longitud de 9 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 73%, con 4 electrodos en un 89% y con 8 electrodos en un 95%. Para una longitud de 10.8 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 79%, con 4 electrodos en un 92% y con 8 electrodos en un 95%. En esta resistividad se tiene un BFR alto, teniendo que

utilizarse un número elevado de electrodos y de longitudes para lograr una reducción significativa de este, de hasta un 95%.

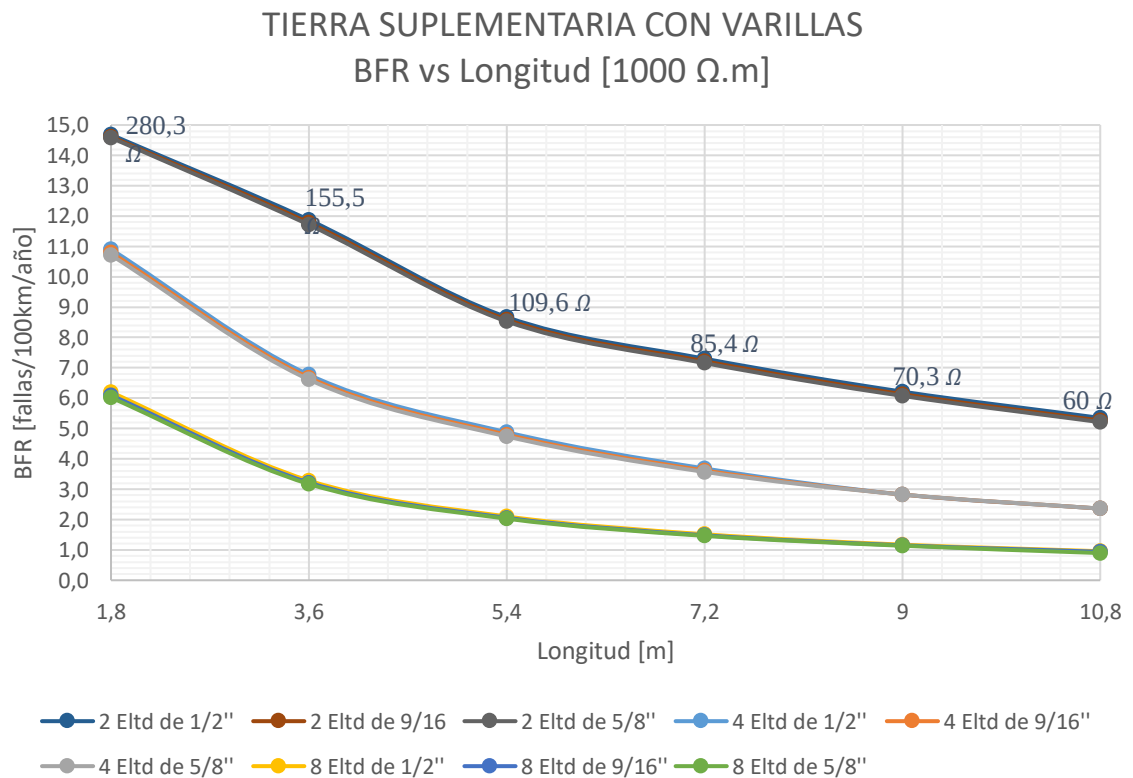
Figura 11. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de 500 $\Omega.m$.



En la Figura 12, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud de enterramiento de los electrodos en un suelo con resistividad de 1000 $\Omega.m$, variando el radio y la cantidad de los electrodos. En este escenario se aprecia que el valor más alto del BFR es de 14.7 *fallas/100km/año*, correspondiente a 2 electrodos y 1.8 *m* de longitud; al utilizar 4 electrodos se reduce el BFR en un 27% y con 8 electrodos en un 59%. Para una longitud de 3.6 *m* y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 20%, con 4 electrodos en un 55% y con 8 electrodos en un 78%. Para una longitud de 5.4 *m* y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 42%, con 4 electrodos en un 68% y con 8 electrodos en un 86%. Para una longitud

de 7.2 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 51%, con 4 electrodos en un 76% y con 8 electrodos en un 90%. Para una longitud de 9 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 59%, con 4 electrodos en un 81% y con 8 electrodos en un 93%. Para una longitud de 10.8 m y utilizando 2 electrodos se reduce el BFR en un 65%, con 4 electrodos en un 84% y con 8 electrodos en un 94%. En esta resistividad se tiene un BFR alto, teniendo que utilizarse 8 electrodos y longitudes de más de 7.2 m para lograr una reducción de hasta un 94% y que esté acorde a la norma de resistencia máxima permitida, consiguiéndose un aumento considerable en la cantidad de materiales necesarios para su construcción.

Figura 12. BFR vs Longitud de electrodos para tierra suplementaria con varillas y resistividad de 1000 $\Omega.m$.



Con este tipo de SPT se evidencia que las mejores reducciones de BFR se logran con 8 electrodos, siendo los cambios más evidentes en terrenos arenosos

semisecos ($500 \Omega.m$) y terrenos rocosos ($1000 \Omega.m$), sin embargo, a partir de cierta longitud en cada escenario no se presentan cambios significativos en la reducción del BFR, pero sí se aumenta de forma considerable la cantidad de material necesaria para construir el SPT. Al utilizar 2 electrodos, se presenta un número alto de fallas en suelos con resistividades grandes y a su vez elevadas resistencias de puesta a tierra, por lo cual, se debe tener en cuenta los valores máximos de resistencia de tierra permitidos por la normatividad nacional vigente. En general, se evidencia una reducción en el BFR cuando se aumenta el número de electrodos enterradas en paralelo, sin embargo, al cambiar el diámetro del electrodo, no se percibe un cambio apreciable en el BFR, especialmente para enterramientos o longitudes muy grandes.

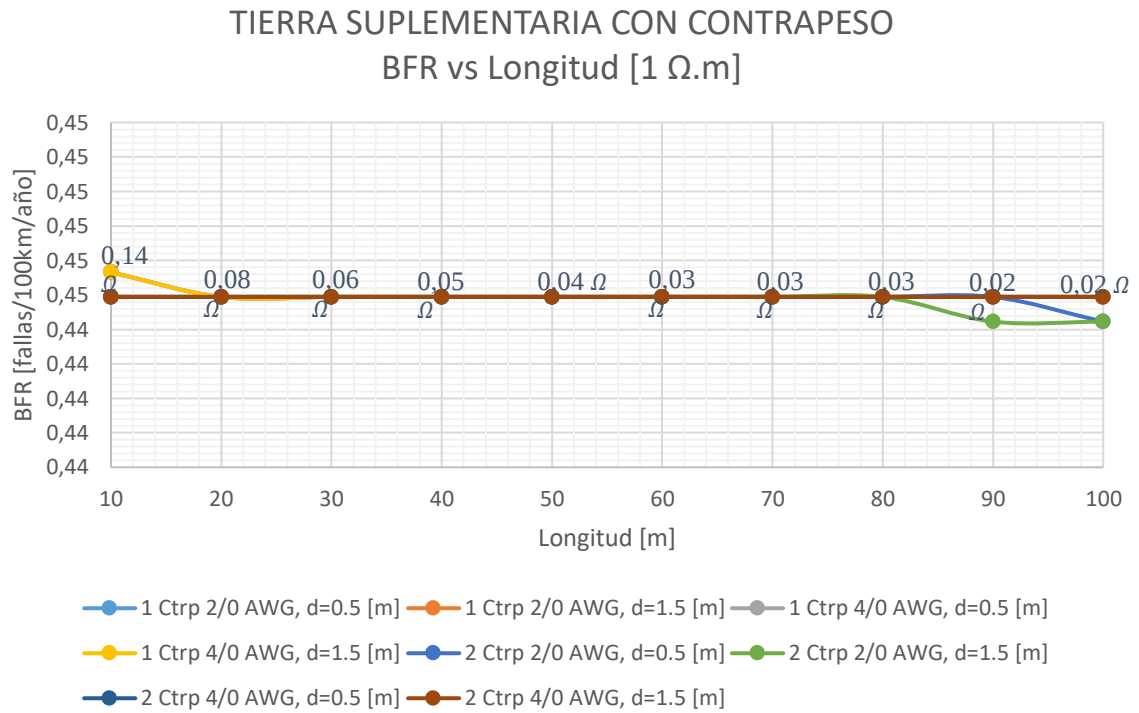
2.2 TIERRA SUPLEMENTARIA CON CONTRAPESOS

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se muestra el BFR en función de las longitudes de los electrodos de contrapeso (Ctp) en los diferentes escenarios de resistividades propuestos, para distintos tipos de cables y enterramientos. También se muestra la resistencia asociada a cada punto en la curva de mayor valor de BFR. Las gráficas están creadas para contrapesos de 10 hasta 100 m de longitud de acuerdo con valores prácticos⁵⁴.

En la Figura 13, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud del cable del contrapeso con resistividad de $1 \Omega.m$, en donde además se variaron el enterramiento, el radio y la cantidad de los cables de contrapeso. En este escenario el cambio de dichos parámetros no representa una variación significativa del BFR.

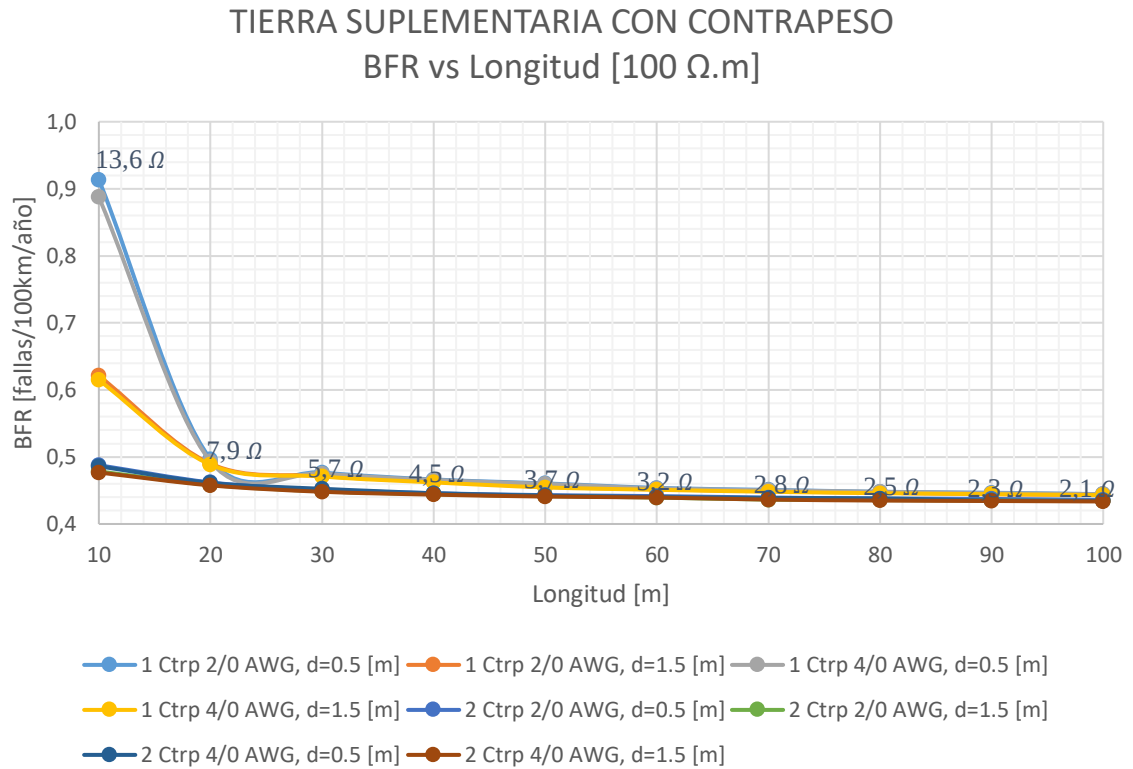
⁵⁴ CASAS F., Op. Cit, +

Figura 13. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de $1 \Omega \cdot m$.



En la Figura 14, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud del cable del contrapeso con resistividad de $100 \Omega \cdot m$, en donde además se variaron el enterramiento, el radio y la cantidad de los cables de contrapeso. En este escenario se aprecia que el valor más alto del BFR es de $0.9 \text{ fallas}/100\text{km}/\text{año}$, correspondiente a 1 contrapeso de 10 m de longitud y enterramiento de 0.5 m; al utilizar 1 contrapeso con enterramiento de 1.5 m se reduce el BFR en un 32%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se reduce el BFR en un 47%. Para 20 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se reduce el BFR en un 46%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se reduce el BFR en un 49%. Para 30 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se reduce el BFR en un 48%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se reduce el BFR en un 50%. Para 40 m o longitudes superiores, se reduce el BFR con respecto a la longitud de 30 m en un 1%

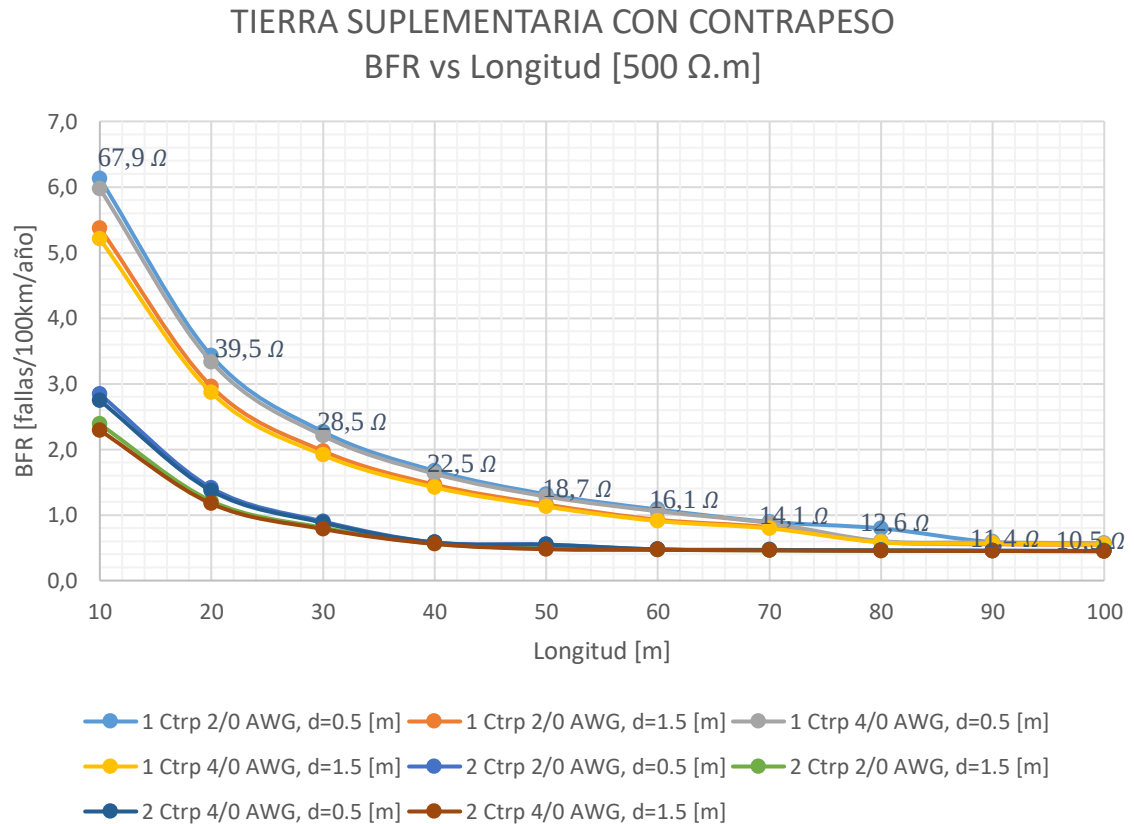
Figura 14. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de $100 \Omega.m$.



En la Figura 15, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud del cable del contrapeso con resistividad de $500 \Omega.m$, en donde además se variaron el enterramiento, el radio y la cantidad de los cables de contrapeso. En este escenario se aprecia que el valor más alto del BFR es de $6.1 \text{ fallas}/100\text{km}/\text{año}$, correspondiente a 1 contrapeso de 10 m de longitud y enterramiento de 0.5 m; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 1.5 m en un 62%. Para 30 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m se reduce el BFR en un 64%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 1.5 m en un 87%. Para 50 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m se reduce el BFR en un 79%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m en un 92%. Para 70 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se reduce el BFR en un 86%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m en un 92%. Para una

longitud de 80 m o superior se reduce el BFR en un 92% sin importar la configuración.

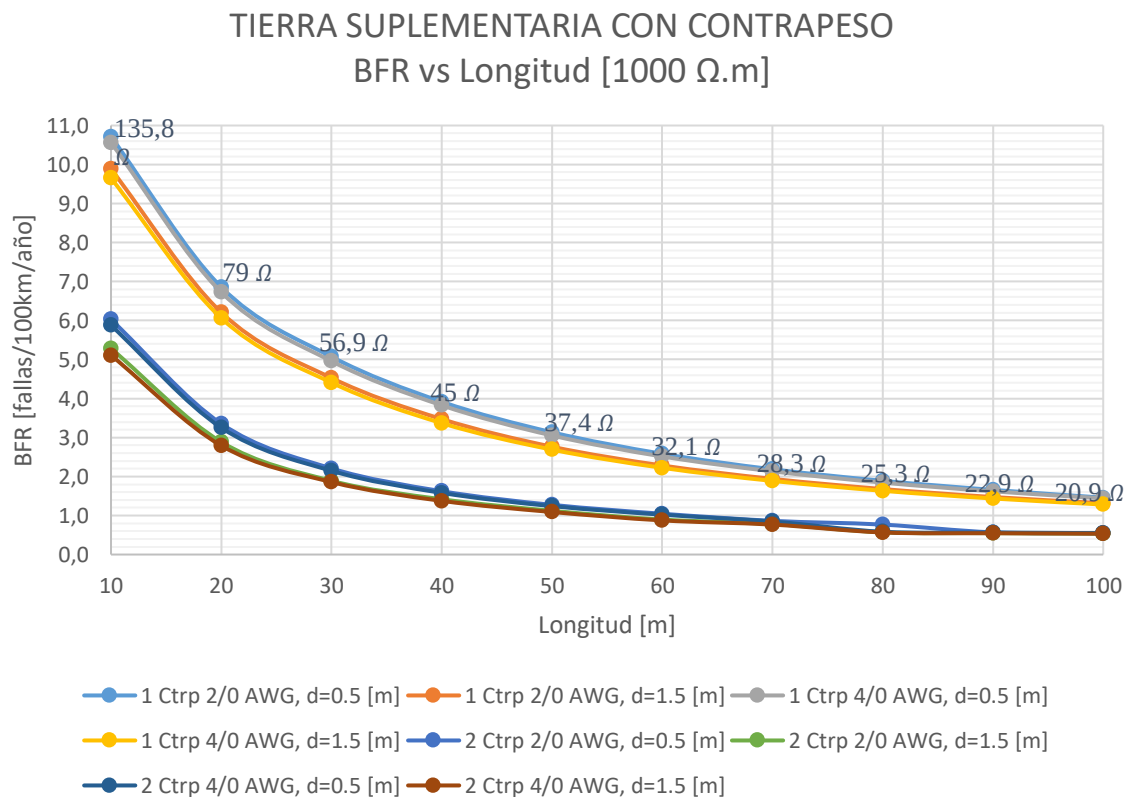
Figura 15. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de 500 $\Omega.m$.



En la Figura 16, se describe el cambio del BFR a medida que se aumenta la longitud del cable del contrapeso con resistividad de 1000 $\Omega.m$, en donde además se variaron el enterramiento, el radio y la cantidad de los cables de contrapeso. En este escenario se aprecia que el valor más alto del BFR es de 10.7 *fallas/100km/año*, correspondiente a 1 contrapeso de 10 m de longitud y enterramiento de 0.5 m; al utilizar 1 contrapeso con enterramiento de 1.5 m se reduce el BFR en un 9%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 1.5 m en un 51%. Para 30 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m se reduce el BFR en un 53%; al utilizar

2 contrapesos con enterramiento de 1.5 m en un 83%. Para 50 m de longitud y 1 contrapeso con enterramiento de 0.5 m se reduce el BFR en un 72%; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 1.5 m en un 90%. Para 60 m y hasta 100 m de longitud 1 contrapeso se presenta una caída de 2% cada 10 m con enterramiento de 0.5 m y 1.5 m; al utilizar 2 contrapesos con enterramiento de 0.5 m o 1.5 m se presenta solo una caída del 3%.

Figura 16. BFR vs Longitud de los cables de contrapesos con resistividad de 1000 $\Omega \cdot m$.



En el SPT de contrapeso, se observa un mejor comportamiento del BFR en altas resistividades, al reducir estos valores de forma significativa, aunque se hace necesario emplear mayor cantidad de materiales y mano de obra para tender el contrapeso en grandes longitudes. En cuanto a aumentar la profundidad de

enterramiento del contrapeso en 1 m en todos los casos estudiados, se observa que la influencia en reducir el BFR es menor al 10% y en longitudes mayores a aproximadamente 60 m la reducción es menor al 8%. En general, se observa para este modelo que, a mayor longitud del contrapeso, al aumentar el número de contrapesos y el enterramiento, se producen mejoras en el BFR, sin embargo, el cambiar el calibre del conductor del contrapeso, no hace que se presente un cambio apreciable.

2.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

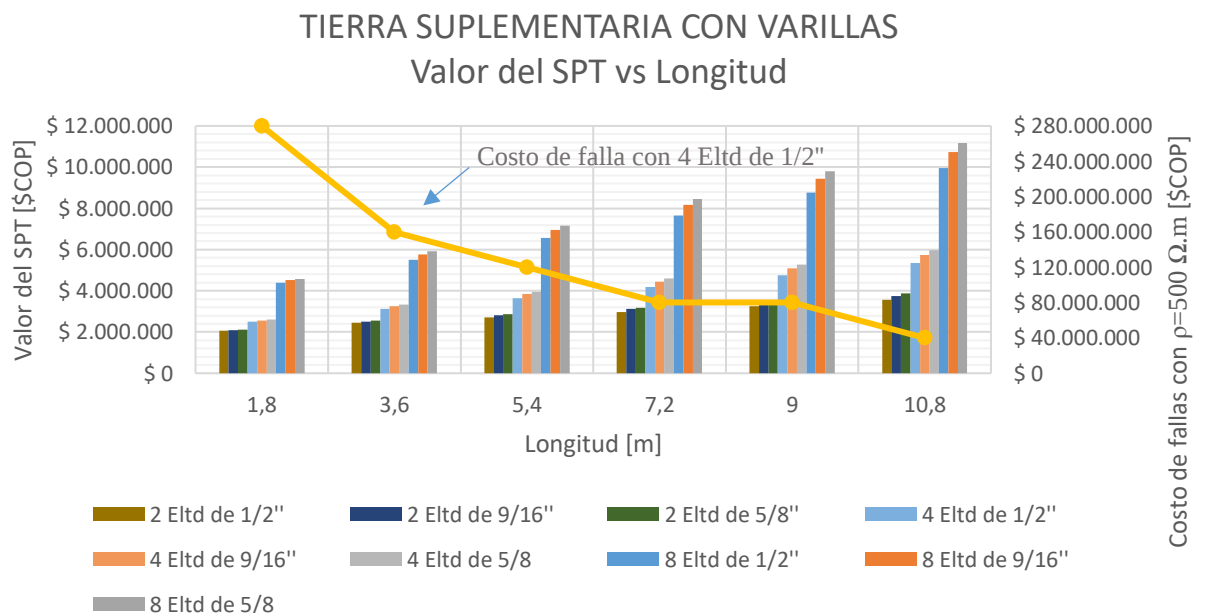
Cada SPT tiene un costo que se ve afectado por los materiales usados (Tabla 2) y la mano de obra, además, de la ubicación en donde se va a construir el SPT. Para este estudio se considera que el lugar de construcción del SPT es de fácil acceso, por tanto, no hay costos adicionales para transportar maquinaria y materiales a ese lugar. También el cambio de resistividad en un terreno no afecta significativamente el valor final para la construcción del SPT, pues en este caso la cantidad de material no cambia y solo se ve afectado por la mano de obra debido a las dificultades propias de cada terreno, considerando costos iguales para todos los escenarios de resistividad.

2.3.1 Tierra suplementaria con varillas. Para construir un SPT de tierra suplementaria con varillas se necesita de los electrodos de cobre, cable de cobre para equipotencializar, conectores para la torre, cajas de inspección para los electrodos de puesta a tierra, moldes para unir los puntos de conexión y soldadura exotérmica que actúa como el elemento que une dichos puntos⁵⁵. La Figura 17 representa el valor de todos los elementos necesarios para construir el SPT de tierra suplementaria con varillas (eje de ordenadas izquierdo), con sus diferentes

⁵⁵ Ibíd.

variaciones en los materiales y cantidad de estos; y el costo que tiene asociado una falla al implementar la configuración del SPT con los valores más críticos del BFR correspondientes a 4 electrodos de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, en el escenario de referencia de $\rho = 500 \Omega.m$ (eje de ordenadas derecho). Se observa que el costo no se ve afectado en gran medida por el diámetro de la varilla que se utiliza como electrodo, ya que su variación es menor al 8%. De igual forma que al aumentar la longitud del electrodo el valor aumenta de forma exponencial y es más significativo si se tiene un mayor número de electrodos. Adicionalmente se tienen en cuenta los valores en la reducción del número de fallas como resultado de la disminución del BFR presentado en la sección 3.1. El costo de una falla tiene un valor unitario aproximado de 40'000.000 \$COP, según estimaciones dadas en la práctica, y está multiplicado por el BFR obtenido para cada caso de longitud y cantidad de los electrodos, que sirven de estimación para cuantificar la inversión y el beneficio obtenido en el primer año (Figura 18) de una configuración de SPT determinada.

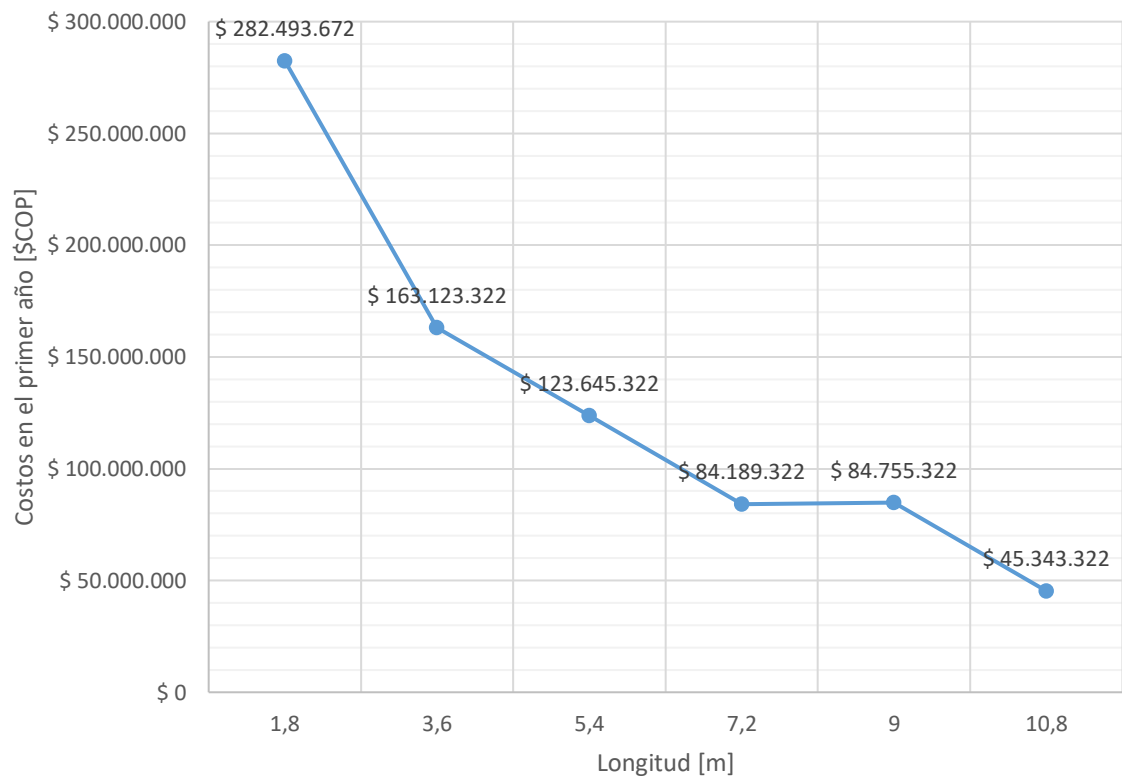
Figura 17. Costo de implementar el SPT de tierra suplementaria con varillas para diferentes longitudes, cantidades de varillas y diámetro; y costo de las fallas para la resistividad de $500 \Omega.m$.



Para el caso crítico descrito de 4 electrodos de 1/2" de diámetro, el BFR más alto es 6.2 *fallas/100km/año*, que se aproxima a 7 *fallas* y el costo de las fallas en esta configuración empieza en 280'000.000 \$COP y a medida que se aumenta la longitud de los electrodos, el BFR disminuye y a su vez también lo hace el costo asociado a la falla hasta un mínimo de 40'000.000 \$COP.

En la Figura 18 se observa el valor de construcción sumado con el costo de la falla, el cuál determina el punto donde se encuentra el beneficio económico que supone invertir en la mejora del SPT en el primer año de operación.

Figura 18. Curva de costos para el SPT de tierra suplementaria con varillas de 4 Eltd de 1/2" para la resistividad de 500 $\Omega.m$, para el primer año de operación.



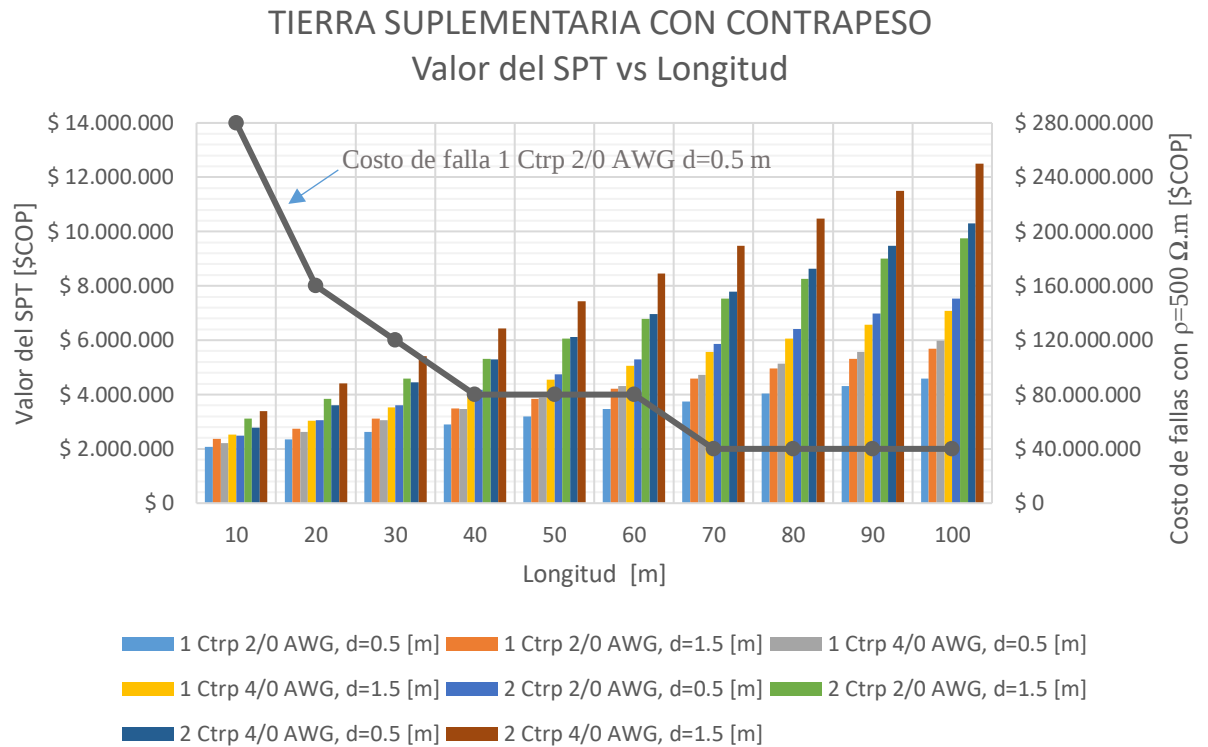
En el SPT de tierra suplementaria con varillas, las distintas configuraciones planteadas en la Figura 17 muestran que tienen un beneficio económico en el primer

año de ser implementada, ya que las fallas siempre van a costar más que el valor de construcción de un SPT a través del tiempo, por tanto, se recomienda para el escenario de referencia de resistividad $500 \Omega.m$ utilizar la configuración de 4 electrodos de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y longitud de $10.8 m$, debido a que en este punto se logran reducir las fallas a un mínimo valor económico y con el menor costo posible de construcción del SPT (Figura 18). En cualquier caso la decisión dependerá de que tan práctico sea alcanzar una determinada longitud de electrodos.

2.3.2 Tierra suplementaria con contrapesos. Para construir un SPT con contrapesos se necesita de los electrodos en forma de cable de cobre desnudo, cable de cobre para equipotencializar, conectores para la torre, cajas de inspección para los electrodos de puesta a tierra, moldes para unir los puntos de conexión, y soldadura exotérmica que actúa como el elemento que une los puntos de conexión⁵⁶, por tanto, la Figura 19 representa el valor que tiene construir el SPT con los materiales mencionados (eje de ordenadas izquierdo); y el costo de la falla al utilizar una configuración del SPT en el escenario de referencia de $\rho = 500 \Omega.m$ (eje de ordenadas derecho) en el primer año.

⁵⁶ Ibíd.

Figura 19. Costo de implementar el SPT de contrapeso con diferentes longitudes, cantidades de cables y profundidades de enterramiento; y costo de las fallas para la resistividad de $500 \Omega.m$, para el primer año de operación.



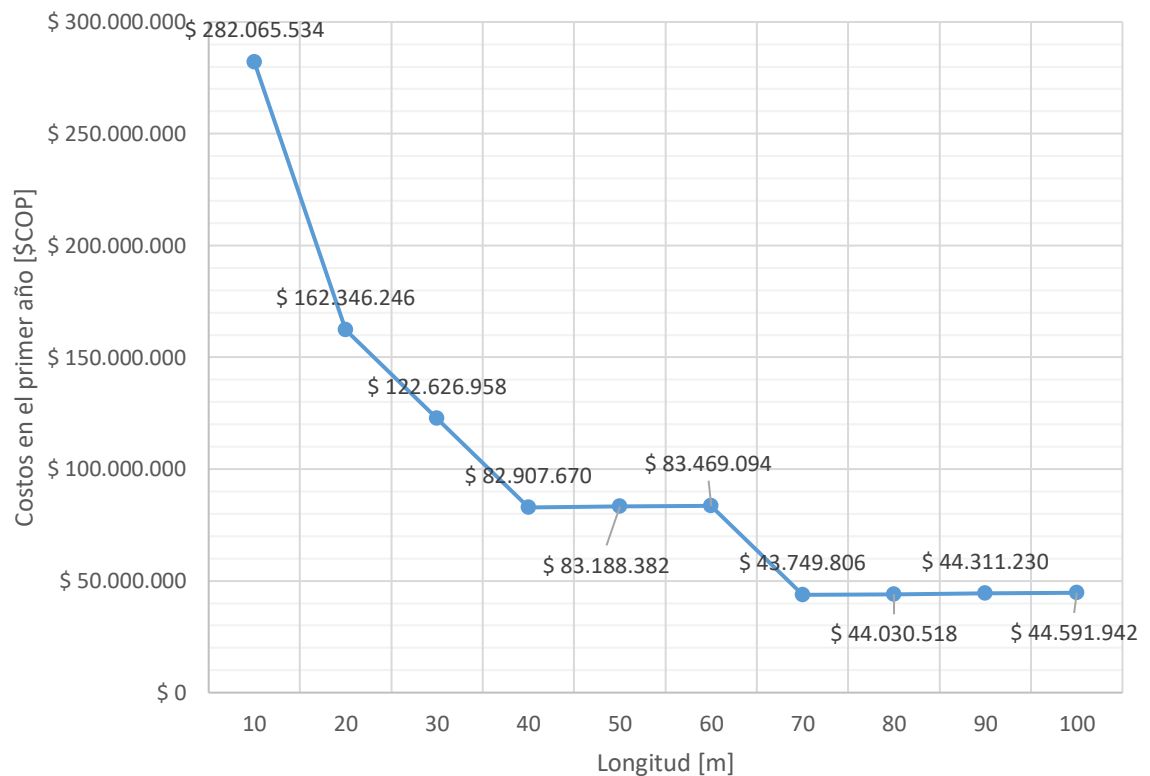
Se observa que en este SPT el costo en 10 m de longitud de los contrapesos puede estar más influenciado por la mano de obra que por el costo de los materiales para construirlo, sin embargo, a mayor longitud del contrapeso el costo de los materiales aumenta de forma exponencial y la mano de obra deja de ser un factor relevante en el valor final del SPT. El costo de construcción también es alterado de forma considerable por la cantidad, el diámetro y la profundidad del contrapeso, al observarse que cambian los costos entre un 7% y 15%.

Para este SPT en el escenario de referencia el valor máximo del BFR es menor a 6,1 fallas/100km/año, que se aproxima a 7 fallas con un costo de 280'000.000

\$COP, y a medida que aumenta la longitud del contrapeso el BFR va disminuyendo, y con esto el costo de la falla disminuye hasta un valor mínimo de 40'000.000 \$COP.

En la Figura 20 se observa el valor de construcción sumado con el costo de la falla, el cuál determina el punto donde se encuentra el beneficio económico que supone invertir en la mejora del SPT, en el primer año de operación.

Figura 20. Curva de costos para el SPT de contrapeso de 1 Ctrp 2/0 AWG y $d=0.5$ m para la resistividad de $500 \Omega \cdot m$, para el primer año de operación.



En el SPT de contrapeso, las distintas configuraciones planteadas en la Figura 19 muestran que tienen un beneficio económico, ya que las fallas siempre van a costar más que el valor de construcción de un SPT a través del tiempo, por tanto, para el escenario de referencia de resistividad de $500 \Omega \cdot m$ se recomienda utilizar la configuración de 1 contrapeso 2/0 AWG con enterramiento de 0.5 m y longitud de

70 m, debido a que en este punto se obtiene el menor costo de construcción del SPT y con un mínimo valor económico de la falla en el primer año de inversión (Figura 20).

2.3.3 Comparación entre SPT. Para establecer cual SPT se recomienda usar, es necesario que ambos tengan un BFR similar, y así hacer una comparación económica para los SPT utilizados. Al comparar en el escenario de 500 $\Omega.m$ el SPT de tierra suplementaria en la configuración de 4 Eltd de $\frac{1}{2}$ " y 10.8 m de longitud se obtiene una resistencia de 14.98 Ω y un BFR de 1 *fallas/100km/año* con un valor de construcción de 5'343.322 \$COP, con el SPT de contrapeso en la configuración de 1 Ctrp 2/0 AWG, 0.5 m de enterramiento y 70 m de longitud se obtiene una resistencia de 14.13 Ω y un BFR de 0.9 *fallas/100km/año* con un valor de construcción de 3'749.806 \$COP.

3. CONCLUSIONES

- Aumentar la longitud de los electrodos tiene especial importancia para terrenos con resistividades mayores a $100 \Omega.m$, en el caso de tierra suplementaria con varillas. En el caso de tierra suplementaria con contrapesos, la longitud es relevante para resistividades mayores a $500 \Omega.m$.
- Cuando se simularon tierras suplementarias se consiguieron reducciones del BFR que van desde el 44% hasta el 95%, combinando el aumento de la longitud, el número y el calibre de los electrodos. En el caso de contrapesos se logran porcentajes de disminución que van desde el 50% hasta el 94%.
- A medida que la resistencia del sistema de puesta a tierra disminuye, el BFR también lo hace, reduciéndose también la cantidad de flameos sobre la línea. Sin embargo, mediante el análisis financiero y el desempeño eléctrico, se observa que hay un punto donde no vale la pena invertir más dinero para mejorar el SPT pues el comportamiento eléctrico se mantiene relativamente constante y sus costos aumentan de manera muy significativa.
- El valor de los SPT de tierra suplementaria con varillas y contrapeso aumentan (especialmente los últimos) al cambiar principalmente las longitudes, calibres o diámetros y cantidad de electrodos en cada sistema, sin embargo, los diámetros o calibres de los electrodos no representan un factor determinante al momento de reducir la resistencia del SPT, ya sea para tierra suplementaria con varillas o contrapeso.
- En líneas de transmisión el costo de una falla es muy elevado comparado con la inversión en un buen SPT, por tanto, mejorar el SPT puede reducir el número de fallas, logrando un beneficio económico significativo a través del tiempo.
- En el escenario de resistividad de referencia de $\rho = 500 \Omega.m$, para obtener aproximadamente el mismo BFR en ambos SPT, se pueden utilizar diferentes configuraciones con costos distintos, por tanto, se busca el SPT con el costo

más bajo de construcción y que tenga un BFR más reducido. De acuerdo al análisis económico es mejor invertir en el STP de contrapeso, pues es más económico de implementar.

4. RECOMENDACIONES

- Se puede avanzar más en el estudio de estos SPT si se incluyen los efectos de ionización del suelo, que suponen un comportamiento más ajustado a la realidad, además de incluir la respuesta en frecuencia de los distintos tipos de electrodos ante impulsos atmosféricos.
- Utilizar distancias de enterramiento muy grandes requiere de una mayor mano de obra, además de que se pueden presentar posibles imprevistos en el terreno, ya sea porque es muy rocoso o porque la ubicación es de difícil acceso, por tanto, no se recomiendan longitudes tan largas de varillas, ni contrapesos con enterramientos profundos.
- En un escenario real, las construcciones de SPT deben tener en cuenta más factores para determinar su precio, entre ellos la ubicación de las torres de transmisión, ya que muchas veces el costo puede aumentar considerablemente por esta razón. También se debe tener en cuenta el costo de las fallas asociado a la línea afectada, ya que este costo es relativo a la capacidad de energía transportada y la importancia de dicha línea.
- El trabajo actual se puede complementar al hacer uso de sustancias para tratar el suelo, y observar cuál puede ser su conveniencia económica y eléctrica frente al estudio hecho en este documento.
- Se puede ampliar la investigación considerando un mayor número de torres a lo largo de toda la línea pues se varía una mayor cantidad de parámetros tales como: resistividad del suelo: al haber diferentes tipos de suelo donde está ubicado cada SPT; densidad de descargas atmosféricas a tierra, pues esta depende de la ubicación geográfica donde se encuentre la estructura; y la altura de la torre, porque de esta depende el máximo valor de tensión visto en los aisladores.

BIBLIOGRAFÍA

ABD-ALLAH M. A., ELYAN T. and BELAL Eman. Back flashover Analysis for Egyptian 500kV and 220kV Transmission towers. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 6, Issue 4, April 2016 289 ISSN 2250-3153

AVILA I. L., DI MAURO G.F. Y SUÁREZ J.A., “Estudio de los efectos de las descargas atmosféricas sobre la confiabilidad de las líneas aéreas de transporte de energía”, III congreso de las américas de distribución eléctrica, Ciudad de Córdoba, Argentina, 2016.

CASAS F., Tierras. Soporte de la seguridad eléctrica, 3ª ed. Bogotá, Colombia: ICONTEC, 2006.

CHISHOLM W. A. y JANISCHEWSKYJ W., “Lightning surge response of ground electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1329-1337, Abr. 1989.

CIGRE working group of lightning, “Guide to the procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”, CIGRE, Paris, Francia, 1991.

DARVENIZA M., POPOLANSKY F., y WHITEHEAD E. R., “Lightning protection of UHV transmission lines”, Electra, no. 41, pp. 39–69, 1975.

DUDURYCH I.M., GALLAGHER T.J., CORBETT J. y ESCUDERO M.V., “EMTP analysis of the lightning performance of HV transmission line”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distribu, vol. 150, no. 4, pp. 501-506, Jul. 2003.

GATTA F.M., GERI A. y LAURIA S., “Backflashover simulation of HV transmission lines with concentrated tower grounding”, Electric Power System Research, vol. 73, pp. 373-381, 2005.

GATTA F.M., GERI A., LAURIA S. y MACCIONI M., “Backflashover simulation of HV transmission lines with enhanced counterpoise groundings”, Electric Power System Research, vol. 79, pp. 1076-1084, 2009.

HILEMAN A.R., Insulation coordination for power systems, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1999.

HUSSEIN, HUSSEIN & CHOMBO, PIUS VICTOR & MARUNGSRI, BOONRUANG. Flashover and Back-Flashover Analysis with Lightning Strokes of 69 kV and 24 kV Lines in Thailand Using ATP/EMTP. International Journal on Energy Conversion (IRECON). 6. 111-121. 10.15866/irecon.v6i4.15253. 2018

IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines, IEEE Standard 1243, 1997.

IEEE working group report, “Estimating lightning performance of transmission lines II – Updates to analytical models”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, no.3, pp. 1254-1267, Jul. 1993.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES
Equipo de conexión y puesta a tierra, NTC 2206, 2001.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES
Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). Parte 3: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida, NTC 4552-3, 2008.

KADIR MZA. AB. y COTTON I., "Implementation of the modified leader progression model in backflashover analysis", IEEE International power and energy conference, Putra Jaya, Malasia, 2006, pp. 516-521.

MARTINEZ J.A. y CASTRO-ARANDA F., "Lightning performance of transmission lines using the EMTP", IEEE Power engineering society general meeting (IEEE Cat. No 03CH37491), Toronto, Ontario, Canadá, 2003, pp. 295-300.

MARUNGSRI B., BOONPOKE S., RAWANGPAI A., OONSIVILAI A., KRITAYAKORNUPONG C.. Study of Tower Grounding Resistance Effected Back Flashover to 500 kV Transmission Line in Thailand by using ATP/EMTP. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol:2, No:6, 2008.

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, 2013.

SARGENT M.A. y DARVENIZA M., "Tower surge impedance", IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. pas-88, no. 5, pp. 680-687, May 1969.

TORRES H., "El espacio y el tiempo en los parámetros del rayo" en El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología, 2ª ed. Bogotá, Colombia: UNIBIBLOS, 2002, cap. 3, pp. 123-131.

TORRES H., "Los rayos: una visión mitológica, científica y tecnológica", Ingeniería en investigación, Vol I, pp. 29-34, 1991.