

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

**ESTUDIO DE LA AFECTACIÓN DE CONTRAPESOS EN TORRES DE
TRANSMISIÓN ANTE FALLAS ATMOSFÉRICAS DE ALTA
FRECUENCIA.**

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Carlos Javier Nicolalde Carrillo

DIRECTOR:

Ing. Ramiro Mauricio Vásquez Villarruel MSc.

Ibarra, febrero 2025



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100425969-1		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Nicolalde Carrillo Carlos Javier		
DIRECCIÓN:	Ignacio Reyes S/N. San Blas - Urcuquí		
EMAIL:	cnicoladec@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2 939 854	TELÉFONO MÓVIL:	0967348664

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estudio de la afectación de contrapesos en torres de transmisión ante fallas atmosféricas de alta frecuencia.
AUTOR (ES):	Carlos Javier Nicolalde Carrillo
FECHA APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	14/02/2025
PROGRAMA:	☒ PREGRADO ☐ POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Ramiro Mauricio Vásquez Villarruel MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de febrero de 2025

EL AUTOR:

Nicolalde Carrillo Carlos Javier

CI: 1004259691



CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Ing. Ramiro Mauricio Vásquez Villarruel MSc. en calidad de director del señor estudiante Carlos Javier Nicolalde Carrillo, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "ESTUDIO DE LA AFECTACIÓN DE CONTRAPESOS EN TORRES DE TRANSMISIÓN ANTE FALLAS ATMOSFÉRICAS DE ALTA FRECUENCIA"

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing. Ramiro Mauricio Vásquez Villarruel MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**DEDICATORIAS**

Dedico este trabajo primero a Dios y a mis ángeles del cielo, por brindarme sabiduría, salud y la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo que se presentó en mi vida universitaria.

Se lo dedico a mis padres Carlos y Anita cuyo amor incondicional, apoyo constante y ejemplo fueron la base para lograr esta meta. Varios de mis logros son gracias a ustedes por formar a un hombre de bien.

Del mismo modo, va dedicado a mis hermanos, Adolfo y Alejandro, quienes me han hecho sentir su cariño y admiración, y espero que este logro los inspire a cumplir todas sus metas.

**AGRADECIMIENTO**

A mi familia, quienes siempre me brindaron palabras de apoyo y coraje para seguir luchando y no desmayar en el proceso de alcanzar este sueño.

A mi prima Karito, una de las personas que más me apoyado en mis estudios académicos y en mi vida diaria, gracias por siempre estar.

Agradezco tutor, Ing. Ramiro Vásquez Villarruel, y a mi asesor Ing. Jhonny Barzola, por su guía, conocimientos y apoyo en el transcurso de mi carrera, pero, sobre todo, en el desarrollo y culminación de este trabajo de grado.

A mis amigos; Alexis, Evelyn, Esteban y Alejandra por su amistad, palabras de aliento y por demostrarme que la verdadera amistad te impulsa a crecer.

Un agradecimiento sincero, a todas las personas que se cruzaron y formaron parte de mi vida en mi periodo universitario, de una u otra manera me ayudaron a cumplir esta meta.



INDICE DE CONTENIDOS

Contenido

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
CAPITULO I	13
INTRODUCCIÓN	13
1.1. Problema de investigación.	13
1.1.1. Problemática a investigar.	13
1.1.2. Formulación de la pregunta de investigación	14
1.2. Objetivos	14
Objetivo General:	14
Objetivos Específicos:	14
1.3. Alcance y delimitación	15
1.4. Justificación	15
1.5. Contexto	16
CAPÍTULO II	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1. Sistemas de Puesta a Tierra	20
2.2. Importancia de los sistemas de puesta a tierra	21
2.3. Componentes básicos de un sistema de puesta a tierra	22
2.4. Aplicación de los sistemas de puesta a tierra	23
2.5. Diseño de sistemas de puesta a tierra	23
2.6. Funciones básicas de los sistemas de puesta a tierra	24
2.7. Clasificación de los sistemas de puesta a tierra	25
2.8. Características de los sistemas de puesta a tierra	26
2.9. Redes de puesta a tierra	26
2.10. Sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión	26
2.11. Componentes de los sistemas de puesta a Tierra	27
2.11.1. Electrodos de puesta a tierra	27
2.11.2. Electrodos horizontales o contrapesos	27
2.11.3. Conductores de enlace	28
2.11.4. Malla de tierra	28



2.11.5.	Conectores	28
2.11.6.	Suelda Exotérmica	28
2.11.7.	Hilo de guarda	28
2.11.8.	Cimentación	29
2.12.	Resistencia de la puesta a tierra	29
2.13.	Resistividad del suelo	31
2.13.1.	Factores que influyen en la resistividad del suelo	31
2.14.	Tipos de suelo	32
2.15.	Descargas Atmosféricas	33
2.16.	Descripción del fenómeno de descargas atmosféricas	34
2.17.	Factores que caracterizan a una descarga atmosférica	35
2.17.1.	Sobrevoltajes temporales:	35
2.17.2.	Sobrevoltajes transitorios:	36
2.18.	El Rayo.....	37
CAPÍTULO III		39
MATERIALES Y MÉTODOS.....		39
3.	Introducción.....	39
3.1.	Materiales	40
3.1.1.	ATP	40
3.2.	Metodología	41
3.3.	Procedimiento.....	42
3.3.1.	Investigación documental sobre sistemas de puesta a tierra (SPAT), en líneas de transmisión.....	43
3.3.2.	Descripción de los componentes utilizados.....	44
3.3.3.	Modelación del sistema de transmisión en el software ATP.....	58
3.3.4.	Simulaciones de descargas atmosféricas en las torres de transmisión, con diferentes longitudes de contrapesos	61
CAPITULO IV		68
RESULTADOS Y ANÁLISIS		68
4.1	Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 2 contrapesos de 50m	68
4.2.	Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 2 contrapesos de 80m.....	70
4.3.	Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 4 contrapesos de 50m	72
4.4.	Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 4 contrapesos de 80m	74



4.5.	Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 6 contrapesos de 50m	75
4.6.	Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 6 contrapesos de 80m	77
4.7.	Análisis de resultados.....	78
CONCLUSIONES.....		82
RECOMENDACIONES.....		83
Referencias Bibliográficas		84
ANEXOS.....		88
Anexo A.....		88
Anexo B.....		88
Anexo C.....		88
Anexo D.....		88
Anexo E.....		89
Anexo F.....		89
Anexo G.....		90
Anexo H Código de programación del Bloque ISF (Aislador), empleado en el estudio.....		90



INDICE DE FIGURAS

Fig 1. Componentes del primer grupo de un SPAT [14]	23
Fig 2. Componentes del segundo grupo de un SPAT [15].....	23
Fig 3. Sistema de puesta a tierra en torres de transmisión. [2]	27
Fig 4. Electrodo de puesta a tierra. [18].....	30
Fig 5. Representación de la descarga atmosférica sobre el cable de guarda [26]	34
Fig 6. Representación de la descarga atmosférica sobre la torre	35
Fig 7. Relación voltaje - tiempo en descargas atmosféricas. [29]	37
Fig 8. Fuente Hediler en ATP	45
Fig 9. Líneas de transmisión en ATP	46
Fig 10. Data de línea de transmisión.	47
Fig 11. Datos de línea LCC usada en la simulación.....	49
Fig 12. Modelo Bergeron de la línea de transmisión	50
Fig 13. Circuito equivalente del modelo PI de un vano de una línea de transmisión. [33]	50
Fig 14. Modelo JMarti en ATP Draw.....	51
Fig 15. Componentes del aislador ISF.....	52
Fig 16. Programación Modo 1 del aislador ISF	53
Fig 17. Resistencia no lineal type 92 (Descargadores de sobrevoltaje)	53
Fig 18. Disposición de un contrapeso horizontal [39]	54
Fig 19. SPAT de 2 contrapesos	55
Fig 20. Disposición de 4 contrapesos, con parámetros mutuos [39]	56
Fig 21. Disposición de 6 contrapesos con parámetros mutuos.....	57
Fig 22. Estructura de suspensión de doble terna con doble cable de guarda 230kV [40].....	58
Fig 23. Modelamiento de la torre de transmisión en ATP	59
Fig 24. Interfaz de ATP, donde se ingresa la longitud del vano de la línea de transmisión.	60
Fig 25. Simulación en ATP de la línea de transmisión escogida	60
Fig 26. Modelos de sistemas de puesta a tierra en torres de transmisión	61
Fig 27. Variables R, L, C de 2 contrapesos de 50m y valor de corriente de rayo en ATP	69
Fig 28. Backflashover generado en la fase C de la primera terna trifásica por el rayo de 70 kA en el SPAT de 2 contrapesos de 50m	70
Fig 29. Variables R, L, C de 2 contrapesos de 80m y valor de corriente de rayo en ATP	71
Fig 30. Backflashover generado en la fase C de la primera terna trifásica por el rayo de 70 kA en el SPAT de 2 contrapesos de 80m	72
Fig 31. Variables R, L, C con 4 contrapesos de 50m y valor de corriente de rayo en ATP.....	72
Fig 32. Sobrevoltajes generados por el rayo de 70 kA en el SPAT de 4 contrapesos de 50m.....	73
Fig 33. Variables R, L, C con 4 contrapesos de 80m y valor de corriente de rayo en ATP	74
Fig 34. Backflashover generado en la fase C de la primera terna trifásica por el rayo de 70 kA en el SPAT de 4 contrapesos de 80m	75
Fig 35. Variables R, L, C de 6 contrapesos de 50m y valor de corriente de rayo en ATP	76
Fig 36. Sobrevoltajes generados por el rayo de 70 kA en el SPAT de 6 contrapesos de 50m.....	77
Fig 37. Variables R, L, C de 6 contrapesos de 80m y valor de corriente de rayo en ATP.....	77
Fig 38. Sobrevoltajes generados por el rayo de 70 kA en el SPAT de 6 contrapesos de 80m.....	78
Fig 39. Representación gráfica de la Fuente Heidler (rayo) en ATP.....	88



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I.	30
TABLA II.	33
TABLA III.	44
TABLA IV.	45
TABLA V.	48
TABLA VI.	62
TABLA VII.	63
TABLA VIII.	63
TABLA IX.	64
TABLA X.	64
TABLA XI.	65
TABLA XII.	65
TABLA XIII.	66
TABLA XIV.	66
TABLA XV.	79
TABLA XVI.	80
TABLA XVII.	80
TABLA XVIII.	88
TABLA XIX.	88
TABLA XX.	88
TABLA XXI.	89
TABLA XXII.	89
TABLA XXIII.	90



RESUMEN

El sistema de transmisión es un componente esencial de un SEP, ya que permite el transporte de energía desde la generación hacia el sistema de subtransmisión, por lo cual es necesario la disponibilidad de un sistema de puesta a tierra en las estructuras de transmisión que garantice la confiabilidad del suministro eléctrico en el caso de presentarse fallas de alta. Es por ello, que en este trabajo se analizaron las características del SPAT en alta frecuencia, así como de los modelos utilizados por el software ATP para la simulación de un SEP, seguidamente se emplearon las fórmulas desarrolladas por E. Sunde para calcular los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia en el SPAT. A continuación, en el software ATP Draw, se modeló, empleando el Modelo Bergeron, un segmento de una línea de transmisión, considerando torres equipadas con distintas configuraciones de contrapesos usando longitudes de 50m y 80m de estos, para luego ingresar los resultados obtenidos de resistencia, inductancia y capacitancia para cada configuración de contrapesos. Finalmente, se determinó un valor de corriente de rayo de 70kA y se realizaron varias simulaciones de descargas atmosféricas en el vano de la línea de transmisión, con el objetivo de determinar si el SPAT cumple la función de desviar la corriente de falla a tierra, evitando un *backflashover*. Posterior a las simulaciones, y luego de un análisis de los resultados obtenidos, presentados en el Capítulo V, se determinó que un SPAT, cumple su objetivo principal de manera más eficiente, cuando se emplea un mayor número de contrapesos con menor longitud, específicamente 50m en este estudio.

Palabras clave: SPAT, línea de transmisión, descargas atmosféricas, contrapesos, ATP Draw



ABSTRACT

The transmission system is an essential component of a SEP, since it allows the transport of energy from the generation to the subtransmission system, so it is necessary the availability of a grounding system in the transmission structures to ensure the reliability of the power supply in the event of high faults. For this reason, in this work the characteristics of the SPAT at high frequency were analyzed, as well as the models used by the ATP software for the simulation of an SEP, consequently the formulas developed by E. Sunde were used to calculate the parameters of resistance, inductance and capacitance in the SPAT. Then, in the ATP Draw software, a segment of a transmission line was modeled using the Bergeron Model, considering towers equipped with different configurations of counterweights using 50m and 80m lengths of these, and then entering the obtained results of resistance, inductance and capacitance for each configuration of counterweights. Finally, a lightning current value of 70kA was determined and several simulations of atmospheric discharges in the transmission line span were performed, with the objective of determining if the SPAT fulfills the function of diverting the fault current to ground, avoiding a *backflashover*. After the simulations, and after an analysis of the results obtained, presented in Chapter V, it was determined that a SPAT fulfills its main objective more efficiently when a greater number of counterweights are used with less length, specifically 50m in this study.

Keywords: SPAT, transmission line, atmospheric discharges, counterweights, ATP Draw



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación.

Estudio de la afectación de contrapesos en torres de transmisión ante fallas atmosféricas de alta frecuencia.

1.1.1. Problemática a investigar.

El comportamiento de los sistemas de puesta a tierra (SPAT) se ve afectado por las descargas atmosféricas, llamadas fallas de alta frecuencia, suelen presentarse en los vanos de los cables de guarda y en las mismas torres pues se consideran los puntos más altos del sistema de transmisión. Las descargas atmosféricas se pueden presentar hasta en un 60% en zonas próximas de las torres de acuerdo con el tipo de torre y de su masa metálica. Este tipo de descargas es diferente de aquel que se presenta cuando la sobre corriente es de baja frecuencia, ya que los fenómenos inductivos y capacitivos del SPAT se vuelven significativos. Es importante considerar los fenómenos antes mencionados para un diseño correcto que garantice la integridad de los equipos presentes que eventualmente están expuestos al impacto de las descargas atmosféricas en los sistemas de transmisión eléctrica.

El problema se genera cuando el comportamiento de los sistemas eléctricos ante una falla de alta frecuencia, presenta una resistencia de puesta a tierra de la estructura muy elevada por lo que, la corriente de la descarga no puede ser disipada a tierra, el no disipar la corriente de falla a tierra hace que la estructura alcance un alto potencial eléctrico, que aumenta exponencialmente el valor de voltaje que existe entre el conductor de fase y el brazo de dicha torre, presentándose un flameo inverso desde el brazo de la torre hacia los conductores por la elevación del potencial en la torre con relación a la resistencia del sistema de puesta a tierra, que la mayoría de veces puede llevar a la salida del circuito por falla del aislamiento.

El uso de los llamados cables de contrapeso en líneas de transmisión es una práctica recurrente, y consiste en enterrar horizontalmente cables conductores conectados a las patas de



estructuras de las torres de transmisión, que la mayoría de las veces no cumplen con los parámetros adecuados y por tal motivo no poseen el funcionamiento correcto.

Uno de estos parámetros es la impedancia de impulso que es la relación entre los valores pico de voltaje y de corriente dependiente de la longitud del contrapeso y de los parámetros como resistividad y permitividad propios del tipo de suelo existente, todos estos parámetros varían también con la frecuencia del fenómeno atmosférico. Para cada condición de resistividad del suelo y frecuencia, la impedancia de puesta a tierra muestra un cierto valor por encima del cual el aumento de longitud de electrodo no logra una disminución significativa de la impedancia de puesta a tierra y, por lo tanto, del sobrevoltaje.

La respuesta de un contrapeso en bajas frecuencias posee grandes diferencias con respecto a su respuesta en frecuencias superiores. Algunos fenómenos que se desprecian por su baja influencia se tornan significativos conforme se incrementa la frecuencia y es por lo que, se debe realizar una evaluación del SPAT en donde se ilustre estos comportamientos, dado que tanto la resistividad como la permitividad sufrían variaciones con la frecuencia.

1.1.2. Formulación de la pregunta de investigación

¿Cómo realizar el estudio de la afectación de contrapesos en torres de transmisión ante fallas atmosféricas de alta frecuencia?

1.2. Objetivos

Objetivo General:

- Realizar un estudio sobre la afectación de los contrapesos (puesta a tierra) en las torres de transmisión ante fallas atmosféricas de alta frecuencia.

Objetivos Específicos:

- Describir el funcionamiento de los sistemas de puestas a tierra y cada uno de los cambios en parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia en torres de transmisión al presentarse descargas atmosféricas.



- Analizar el funcionamiento de los contrapesos de mayor longitud respecto a el funcionamiento de contrapesos de menor ante fallas atmosféricas de alta frecuencia.
- Realizar las simulaciones pertinentes en el software ATP para determinar la óptima longitud del contrapeso para un correcto funcionamiento de los sistemas de puesta a tierra al presentarse fallas de alta frecuencia.

1.3. Alcance y delimitación

Estudio de la afectación de contrapesos en torres de transmisión ante fallas atmosféricas de alta frecuencia, será una investigación de carácter teórica con datos recopilados de varias bibliografías y simulaciones para conocer el funcionamiento de los contrapesos cuando tengan una mayor o menor longitud entre el punto de anclaje de la torre y el final del mismo, es decir, se hará énfasis en los parámetros de resistencia, inductancia, y capacitancia que se pueden presentar en caso de que una descarga de alta frecuencia suceda en la línea de transmisión.

Para el estudio se realizarán varias simulaciones en el software ATP, en el cual se usarán valores de longitudes cambiantes en los datos de contrapesos, el valor de la magnitud de corriente de las descargas atmosféricas será aquel que se mantenga en los estándares de varios trabajos investigativos relacionados al tema, también en las variables eléctricas, los valores de impedancia, reactancia serán mayores y menores de según el caso de estudio requerido, es decir se analizarán las fallas ante descargas atmosféricas usando la variación de valores en los parámetros ya mencionados, dado que se estos se presentan en el sistema de puesta a tierra conforme a la frecuencia de la descarga atmosférica.

1.4. Justificación

La aplicación o realización del presente estudio permitirá un conocimiento mayor acerca del funcionamiento de los SPAT en estructuras de transmisión, cuando se use contrapesos de mayor o menor longitud, un menor número de contrapesos con mayores longitudes o más contrapesos con menor longitud, formando una malla de tierra mucho más sólida, de acuerdo con las características de resistividad que presente el terreno donde se instala la torre de transmisión.



El estudio del comportamiento de los contrapesos en fallas de alta frecuencia permitirá que los futuros proyectos de líneas de transmisión incluyan en sus investigaciones y diseños, las pertinentes simulaciones de dichas fallas y como actuará el SPAT, tomando en cuenta los parámetros propios del suelo. De esta manera, se disminuye la probabilidad de interrupciones del servicio de electricidad por causa de las descargas atmosféricas, significando una mejora consecuente en los índices de calidad del servicio de transmisión y distribución eléctrica hacia los usuarios.

También se parametrizará un diseño apropiado de la puesta a tierra para que una estructura logre o alcance una impedancia de puesta a tierra reducida, presentando una distribución de potencial de forma equitativa y segura en sistema de puesta a tierra con los respectivos parámetros de los contrapesos a usarse, lo que permitirá que si se presenta una descarga atmosférica esta no resulte peligrosa para personas y semovientes que se encuentren en el suelo cercano a la torre, por un incorrecto funcionamiento de todo el sistema de puesta a tierra.

1.5. Contexto

Un SPAT es el conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico, que conecta los equipos que lo conforman con el suelo para distribuir las corrientes eléctricas de falla en el suelo. “En el caso específico de las líneas de transmisión de energía eléctrica, el sistema de puesta a tierra está compuesto por cables de guarda, estructura de soporte y los electrodos, cables, conexiones y contrapesos que se encuentran enterrados en el suelo” [1].

Los sistemas de transmisión en todo el mundo contemplan varios parámetros para su diseño, enmarcados en un correcto funcionamiento con las normas de seguridad adecuadas.

Los parámetros de uso en estos diseños son:

- Cantidad de aisladores
- Espaciamiento eléctrico
- Angulo de apantallamiento
- Sistemas de puesta a tierra en cada estructura metálica.



Cada uno de los parámetros mencionados cumple un rol específico e importante en los sistemas de transmisión para un correcto funcionamiento y confiabilidad del sistema, lo que permite que el transporte de energía no se vea afectado hasta el sistema distribución.

Con respecto al espaciamiento eléctrico, este parámetro tiene menor importancia en las exigencias atmosféricas ya que las líneas de transmisión presentan un aumento del nivel de aislamiento en los conductores [2].

En el ambiente los fenómenos meteorológicos producen descargas eléctricas, las cuales pueden afectar el funcionamiento de los sistemas eléctricos, equipos electrónicos e incluso causar daños a las líneas de transmisión de energía cuando no se emplean sistemas de protección [3].

En la actualidad en el Ecuador existe el Sistema Nacional de Transmisión, quien se encarga de transportar la energía producida en las distintas generadoras del país, hasta las empresas de distribución.

“El Sistema Nacional de Transmisión, cuenta actualmente con líneas de transmisión que operan en niveles de voltaje: 500, 230 y 138 kV”. También existen líneas de interconexión internacionales a nivel de 230 kV [4].

“Las líneas y subestaciones que constituyen el anillo de 230 kV y las líneas que operan a 500 kV, conforman el sistema troncal de transmisión” [4].

Las líneas aéreas de transmisión están expuestas al impacto de descargas eléctricas atmosféricas que son clasificadas como un transitorio electromagnético de frente rápido y amplio que posee un tiempo en orden de μs , así mismo posee una pendiente inicial muy pronunciada que llega hasta un valor pico y esta decrece lentamente comportándose como una onda de alta frecuencia llegando a alcanzar decenas de millones de voltios y su magnitud fluctúa de en orden de kA de corriente [5].

Los SPAT seguros tienen dos objetivos esenciales. El primero es, proporcionar la conducción de corrientes eléctricas a la tierra durante las condiciones normales y de falla, sin exceder los límites de los niveles de seguridad o afectar la continuidad del servicio. El segundo es



garantizar que una persona en contacto con objetos conectados a tierra no se exponga al peligro de descarga eléctrica [6].

“El equipo de puesta a tierra para líneas de transmisión es una parte del sistema eléctrico de potencia muy importante, está compuesto de cuatro elementos que son pararrayos, aisladores, herrajes e hilos de guarda” [7].

En el diseño de una puesta a tierra se consideran varios factores, siendo el principal la resistividad del suelo, la cual se obtiene mediante mediciones que se realizan al terreno donde se implementará el sistema de puesta a tierra [8].

Un SPAT es una instalación eléctrica que tiene como misión fundamental derivar corrientes de falla hacia tierra y así establecer un contacto con la misma; en tal sentido las corrientes involucradas en una descarga atmosférica pueden ser de naturaleza estacionaria o casi estacionaria, y de alta frecuencia; dichas corrientes pueden ser originadas por un fenómeno natural [2].

Para que un sistema de puesta a tierra cumpla las especificaciones adecuadas de funcionamiento, este debe poseer las siguientes características:

La malla de puesta a tierra estará constituida por cables colocados perpendicular y paralelamente con un adecuado espaciamiento de acuerdo con la resistividad del suelo.

La malla de tierra está compuesta por varios conductores desnudos, generalmente de cobre que permiten la conexión de los equipos eléctricos de una instalación a tierra [9].

En los sistemas de puesta a tierra la “metodología de contrapesos trata de buscar mayores áreas de contacto con un terreno de forma horizontal y con una determinada altura que se da entre (40 a 60 cm) de profundidad” [2]. Esto de acuerdo con la estratificación del terreno y el tipo de terreno



Los electrodos horizontales o contrapesos son conductores de gran longitud enterrados horizontalmente, son muy usados en las puestas a tierra de torres de transmisión porque tienen mayor área de contacto con el terreno [9].



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas de Puesta a Tierra

El objetivo principal de un SPAT es encauzar las corrientes de falla hacia el suelo, logrando así una conexión con la tierra, es decir, es un conjunto de elementos que brindan un camino de muy baja impedancia para disipar corrientes que podrían causar daños en los equipos o dañar la integridad de alguna persona [10]. Las corrientes de falla existentes por descargas atmosféricas presentan distintas características, como ser estacionarias o casi estacionarias, de alta frecuencia o electromagnéticas en forma de impulsos. Por consiguiente, se ha comprobado que incluso un sistema de puesta a tierra básico cumple con los requisitos necesarios para ser considerado como tal, confirmando su condición de ser una instalación esencial para garantizar la seguridad eléctrica [2].

El sistema de puesta a tierra se constituye de uno o varios electrodos que se conectan mediante uniones de compresión o soldadura exotérmica, estos electrodos se encuentran enterrados en el suelo y se conectan al sistema eléctrico a través de un cable desnudo conocido como bajante de aterramiento [11].

En el diseño de un sistema de puesta a tierra, es esencial tomar en cuenta la naturaleza del suelo en la zona, ya que esto influirá en el tipo y la capacidad del sistema requerido. Para una evaluación precisa, se deben realizar mediciones y analizar distintos factores, como la resistividad del suelo, su homogeneidad, el nivel de humedad, la temperatura y la presencia de materiales metálicos. Además, es crucial considerar la disponibilidad de espacio para la instalación, junto con otros aspectos pertinentes [8].

Es de gran importancia que los sistemas eléctricos posean un sistema de puesta a tierra, que garantice la seguridad de las personas que cumplen labores en distintas áreas del sistema eléctrico. Esto implica asegurarse de que los voltajes de contacto y de paso no excedan los límites tolerables por los seres humanos en caso de alguna falla.



2.2. Importancia de los sistemas de puesta a tierra

La importancia de los sistemas de puesta a tierra se fundamenta en evitar que cualquier equipo/elemento descargue su potencial eléctrico a tierra a través del cuerpo humano, en caso de entrar en contacto accidentalmente con este, en condiciones normales cualquier equipo puede tener en sus partes metálicas una carga eléctrica, bien sea por electricidad estática o bien por una falla eléctrica, en este últimos caso para evitar una descarga eléctrica cuando se toca dicho equipo se exige que éste tenga sus partes metálicas aterradas [9].

La implementación de un sistema de puesta a tierra es necesario y está sujeto a regulaciones en todas las instalaciones eléctricas, destacando su crucial importancia en líneas de transmisión y subestaciones, debido a la exposición de operarios a altos voltajes, como lo manifiesta la norma IEEE-80. Es fundamental que las estructuras metálicas mantengan un potencial mínimo en relación con la tierra, tanto en condiciones normales como en casos de fallo, con el fin de evitar voltajes peligrosos [9].

Es crucial tener en cuenta que la puesta a tierra es un componente esencial y se encuentra interconectada con el sistema eléctrico. La conexión a tierra de las instalaciones eléctricas está íntimamente ligada a la seguridad, por lo tanto, su diseño y montaje deben ser llevados a cabo de forma adecuada. Por lo general, la puesta a tierra se planifica con el objetivo de cumplir funciones básicas de protección [7].

La principal tarea del sistema de tierra es crear múltiples caminos para desviar corrientes eléctricas hacia la tierra o establecer contacto con ella de manera que no se sobrepasen los límites de seguridad, evitando interrumpir la continuidad del servicio eléctrico [12].

La existencia de un sistema de puesta a tierra es de vital importancia en cualquier instalación que posea dispositivos o equipos eléctricos. Su función principal es crear un camino despejado hacia el suelo en caso de fuga eléctrica en la red eléctrica o en cualquier circuito eléctrico. Esta medida de precaución evita que una descarga eléctrica afecte a cualquier



persona que entre accidentalmente en contacto con los elementos afectados por la fuga eléctrica [13].

La conexión a tierra no es de capacidad infinita e impedancia nula. Sin embargo, la impedancia del sistema de tierra deberá ser lo bastante baja, de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de protección, los cuales a su vez provocarán la operación de interruptores o fusibles para interrumpir el flujo circulatorio de corriente [7].

Otro objetivo de un sistema de puesta a tierra es establecer conexiones equipotenciales en los elementos existentes. Esto para evitar que sí, una persona toca una estructura metálica conductora expuesta que no está aislada de la electricidad corra peligro para ella, puesto que la mayoría de los equipos eléctricos están alojados en armarios metálicos, y si un conductor energizado entra en contacto con ellos, la cubierta también se energiza temporalmente. La finalidad de la conexión a tierra es garantizar que, en caso de que se produzca un fallo de este tipo, el potencial en todas las estructuras metálicas conductoras expuestas sea prácticamente el mismo. En otras palabras, la conexión a tierra iguala el potencial dentro de la zona, minimizando las diferencias de potencial y creando una "superficie equipotencial" [7].

2.3. Componentes básicos de un sistema de puesta a tierra

Los elementos fundamentales de un sistema de puesta a tierra se clasifican en dos grupos: los componentes del sistema de aterramiento, que se encuentran enterrados por debajo del nivel del suelo, y los elementos que se ubican en la superficie.

PRIMER GRUPO

- Electrodo: Varilla de cobre y/o placa de cobre
- Malla de puesta a tierra
- Conductores desnudos de cobre (contrapeso horizontal)

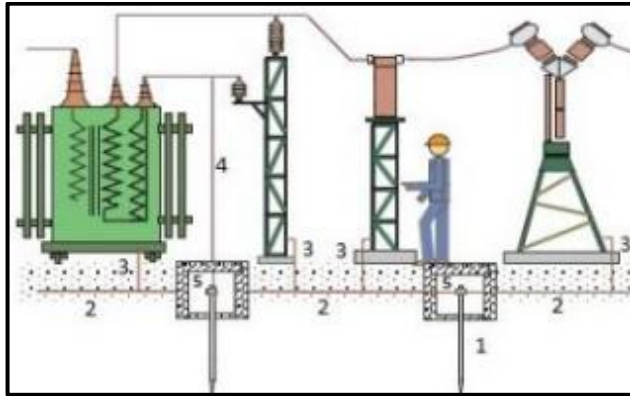


Fig 1. Componentes del primer grupo de un SPAT [14]

SEGUNDO GRUPO

- Cable de guarda
- Estructura de soporte
- Conductor de enlace

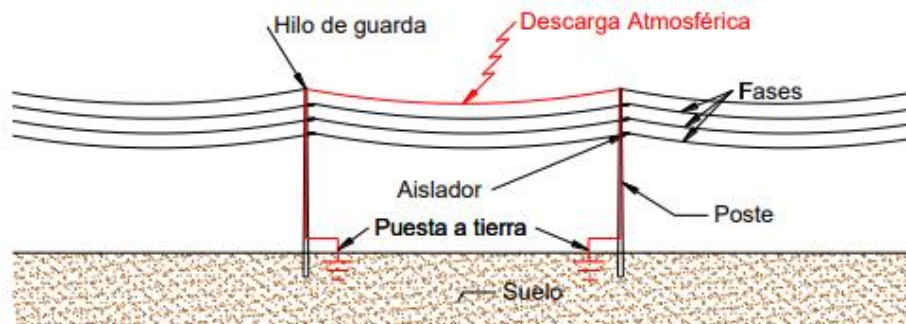


Fig 2. Componentes del segundo grupo de un SPAT [15]

2.4. Aplicación de los sistemas de puesta a tierra

Comúnmente, los sistemas de puesta a tierra poseen diversas aplicaciones en lugares como las subestaciones, líneas de transmisión, industrias, equipos eléctricos, entre otros. Estos sistemas son cuidadosamente diseñados para garantizar una baja resistencia, permitiendo un rápido despeje de fallas en sus instalaciones.

2.5. Diseño de sistemas de puesta a tierra

El diseño de los sistemas de puesta a tierra se fundamenta en conceptos convencionales, a pesar de reconocer la alta complejidad de su implementación. Por dicho motivo, resulta



crucial construir un sistema de puesta a tierra considerando las diversas características de los suelos, componentes y equipos a salvaguardar. Los sistemas de puesta a tierra se enmarcan en la norma IEEE Std. 80-2013 [16], principalmente para su diseño en subestaciones eléctricas de transmisión y distribución, su objetivo principal es proporcionar orientación e información sobre la seguridad de las conexiones al diseñar una malla de puesta a tierra. Esta guía se basa principalmente en frecuencias de 50-60 Hz, donde establece los límites de seguridad de voltaje que el cuerpo humano puede resistir en condiciones de falla, proporcionando un procedimiento de seguridad para un diseño seguro [17].

2.6. Funciones básicas de los sistemas de puesta a tierra

Un SPAT se establece para facilitar el paso de las corrientes de fallo y las corrientes generadas por rayos, asegurando una trayectoria de baja resistencia hasta el suelo.

Una de las funciones básicas de un sistema de puesta a tierra es proteger la seguridad del personal, equipos y estructuras en situaciones de fallo eléctrico, teniendo en cuenta los niveles de corriente máxima tolerable por un ser humano [17].

Este tipo de sistemas se instala con la finalidad de proporcionar los medios adecuados para disipar las corrientes eléctricas a la tierra en condiciones normales y de falla, sin exceder los límites de operación de los equipos, asegurando que una persona próxima a instalaciones con conexión a tierra no corra el riesgo de sufrir una descarga eléctrica crítica [18]. Algunas de las funciones que desarrolla el SPAT se detallan a continuación:

- Garantizar la seguridad de las personas.
- Generar un circuito de baja resistencia para la descarga de la corriente a tierra.
- Eliminar la corriente producida por una descarga atmosférica evitando generar sobrevoltajes.
- Incrementar la confiabilidad de operación del sistema eléctrico, evitando interrupciones del suministro por fallas.
- Protección a las instalaciones y equipos.
- Generar equipotencialidad eficiente en el sistema eléctrico
- Establecimiento y permanencia de un potencial de referencia.



2.7. Clasificación de los sistemas de puesta a tierra

La clasificación de los sistemas de puesta a tierra se da de acuerdo con su aplicación:

- **Puesta a tierra de los sistemas eléctricos:** En los sistemas eléctricos, se implementa la conexión a tierra con el fin de disipar las corrientes generadas por fallas y descargas atmosféricas. Además, se utiliza para controlar los voltajes en relación con la tierra. Los elementos que deben estar conectados al sistema de puesta a tierra en los sistemas eléctricos incluyen los neutros de los transformadores, los motores y los circuitos de bajo voltaje [19].
- **Puesta a tierra en los equipos eléctricos:** El propósito es eliminar cualquier posible potencial de toque que pueda suponer un riesgo para la seguridad de las personas, al mismo tiempo que se garantiza el adecuado funcionamiento de las protecciones ante posibles sobre corrientes en los equipos
- **Puesta a tierra de protección atmosférica:** La función de los sistemas de puesta a tierra respecto a los eventos atmosféricos es proteger contra los rayos, que impactan sobre edificaciones, objetos o estructuras, mediante múltiples componentes que funcionan en armonía, para que la corriente de los fenómenos atmosféricos que los acompaña no represente un peligro para el personal involucrado [20].

El número de componentes existentes en un SPAT determina otra clasificación:

- **Sistema de puesta a tierra simple:** Considerados como los más frecuentes y simples, debido a que no necesitan una alta capacidad para disipar corrientes de falla, estos sistemas consisten en un único electrodo o varilla que se entierra en el suelo para tener un rango de resistividad entre 15Ω a 25Ω ; es empleado en viviendas y en sistemas aéreos de bajo y medio voltaje.
- **Sistema de puesta a tierra de malla:** Este tipo de sistema de puesta a tierra es de mayor complejidad y se denomina malla de conexión a tierra debido a su configuración. Se compone de la unión de múltiples electrodos y conductores de cobre desnudos mediante el proceso de soldadura exotérmica. Es empleado en sistemas eléctricos de gran potencia, como subestaciones eléctricas, centrales generadoras y transformadores de alta potencia. Para construir e implementar estos sistemas de puesta a tierra, es



necesario realizar un análisis matemático basado en los valores operativos de los sistemas eléctricos donde serán instalados. Existen estándares, como el IEEE Std 80-2000 [16], que regulan y supervisan la modelización matemática, construcción e instalación de estos sistemas de puesta a tierra.

2.8. Características de los sistemas de puesta a tierra

Las características principales de los sistemas de puesta a tierra son:

- **Protección de seres humanos:** Su función principal es salvaguardar a las personas de sufrir accidentes, ya sean leves o graves, causados por la circulación de corriente a través del cuerpo debido a la presencia de una diferencia de potencial.
- **Protección de las instalaciones:** El sistema de tierra protege todos los equipos conectados a él, evitando daños por corrientes excesivas.
- **Conducción de corrientes de falla:** Su intención radica en conducir rápidamente la corriente de las fallas a tierra, para evitar daños en los equipos y pérdidas económicas.

2.9. Redes de puesta a tierra

Las redes de puesta a tierra son consideradas, tanto los sistemas que cuentan con un solo electrodo enterrado en el suelo como las conocidas mallas. La manera más básica de implementar una puesta a tierra es conectar un solo electrodo en un circuito o sistema eléctrico, los cuales se presentan comúnmente en áreas externas a viviendas o lugares de trabajo. Los sistemas avanzados de puesta a tierra contienen un gran número de varillas de puesta a tierra interconectadas en forma de malla o retícula, placas de puesta a tierra, contrapesos y bucles de conexión. Estos sistemas se instalan típicamente en subestaciones de energía eléctrica, sistemas de transmisión y generadoras de energía eléctrica [9].

2.10. Sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión

Los sistemas de puesta a tierra, en líneas de transmisión de un sistema eléctrico de potencia, están compuestos por cables de protección (cable de guarda), estructuras de soporte, conductores y elementos específicos del sistema de energía, como aisladores y dispositivos de



descarga. Los cables de guarda cumplen un importante rol de protección de las líneas de transmisión contra los rayos. Trabajan mano a mano con el sistema de puesta a tierra, que establece una conexión de baja impedancia entre la estructura y la tierra [5].

El sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión posee electrodos o varillas verticales y los contrapesos horizontales enterrados a baja profundidad cercanos a la base de la torre, en casos escasos existen también mallas. Los contrapesos presentan una mayor superficie de contacto con el suelo, lo que mejora las condiciones de equipotencialidad en sistema de conexión a tierra [2]. El sistema de puesta a tierra de torres de transmisión se muestra en Fig 3.

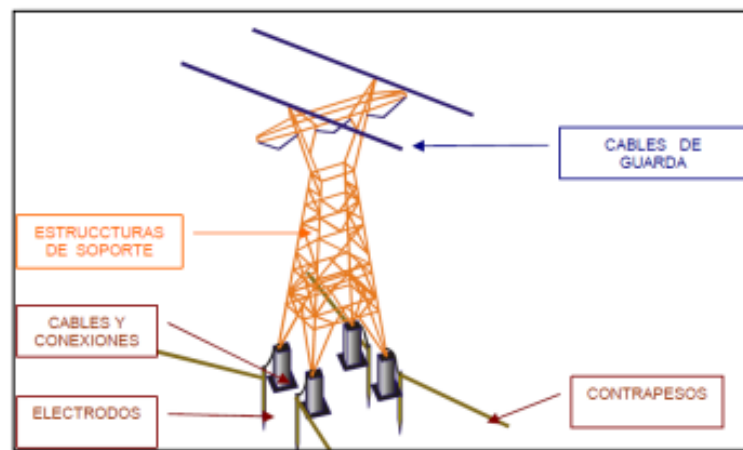


Fig 3. Sistema de puesta a tierra en torres de transmisión. [2]

2.11. Componentes de los sistemas de puesta a Tierra

2.11.1. Electrodos de puesta a tierra

Estos componentes suelen ser conductores sin aislamiento, o varillas de cobre copperweld de 3/4 o 5/8 pulgadas que se entierran en el suelo para establecer contacto con la tierra y salvaguardar a los trabajadores, dispositivos eléctricos y electrónicos que forman parte del sistema eléctrico en caso de cortocircuitos o rayos y no alteran su composición interna al contacto con el terreno por humedad o acciones químicas.

2.11.2. Electrodos horizontales o contrapesos

Los contrapesos horizontales llamados contrapesos son conductores largos enterrados de manera horizontal a una profundidad mínima de la superficie y son



considerablemente empleados en los sistemas de aterramiento de torres de transmisión debido a su mayor superficie de contacto con el suelo.

2.11.3. Conductores de enlace

Se usan conductores de cobre gracias a la conductividad eléctrica y térmica que poseen, transmiten el potencial de seguridad y referencia existente en el suelo a cualquier equipo o lugar de la instalación [19], y deben tener un correcto dimensionamiento, para que sea efectiva la seguridad y estabilidad de los electrodos [9].

2.11.4. Malla de tierra

La malla de puesta a tierra o conocida como red de puesta a tierra es un sistema con interconexiones de una serie de electrodos y conductores formando un arreglo en un patrón sobre una superficie específica y enterrada bajo la superficie del suelo [21].

2.11.5. Conectores

Los conectores posibilitan la interconexión de conductores en el sistema de puesta a tierra. Estos componentes se utilizan para uniones cruzadas o paralelas, así como para el cruce de cables en mallas. Por lo general, están fabricados en materiales como aleación de cobre/zinc, cobre o acero galvanizado, y cuentan con tornillería de acero inoxidable, lo que le proporciona resistencia a la corrosión.

2.11.6. Suelta Exotérmica

Componente mayormente eficiente que los conectores tradicionales, el proceso de suelta se puede realizar en cobre, cobre a acero, acero a acero y aluminio a aluminio. La unión de los materiales se realiza mediante una carga explosiva que funde el material compactándose entre sí.

Describe un proceso químico en el cual se libera una gran cantidad de calor, lo que resulta en la fusión del metal. Esto permite la conexión o unión de los conductores de cobre, logrando una mayor resistencia y un contacto sólido que aumenta su durabilidad [22].

2.11.7. Hilo de guarda

El hilo o cable de guarda es un conductor que se instala en paralelo por encima de los conductores de fase. Este componente se coloca en la parte superior de la estructura



con el propósito de proteger y aislar los conductores de fase, en caso de una descarga atmosférica.

2.11.8. Cimentación

Las torres de las líneas de transmisión poseen cuatro puntos de apoyo en la base. Los puntos de apoyo pueden estar embebidos dentro de concreto, llamado cimentación de concreto, o bien, estar enterrados en el suelo, conocida como cimentación de acero. Las cimentaciones representan un aspecto fundamental de estudio, puesto que su finalidad es transferir las cargas de diversas estructuras al suelo. Comúnmente, se utilizan cimentaciones de concreto armado debido a que aseguran la estabilidad de las torres de transmisión acompañado de un estudio geotécnico para asegurar su aprobación en términos de seguridad y eficiencia económica

- **Cimentación grilla o emparrillado:** La cimentación grilla se la llama también como cimentación en acero, tiene como característica principal el estar directamente enterradas en el suelo.
- **Cimentación en concreto:** Se da cuando las patas de la torre se encuentran sobre una estructura de hormigón, y se utiliza específicamente cuando la capacidad de carga del suelo es insuficiente.

2.12. Resistencia de la puesta a tierra

La resistencia de un sistema de puesta a tierra es la medida de cuánto resiste el flujo de corriente en sus componentes. Esta resistencia está estrechamente vinculada a la composición natural del suelo, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas. En otras palabras, la resistencia del suelo será reducida cuando este se encuentre abundantemente humedecido, presente una composición arcillosa y contenga una alta concentración de minerales conductores. Al contrario, se observará una elevada resistencia de puesta a tierra en casos donde el suelo presente una composición seca y una notable cantidad de rocas [13].

La resistencia que se presenta al paso de la corriente eléctrica a través de un electrodo hacia el suelo tiene tres componentes principales:

- Resistencia propia de los electrodos de cobre.



- Resistencia existente entre el suelo y el electrodo
- Resistencia de la tierra circundante al electrodo.

El valor total de la resistencia de puesta a tierra está determinado por la resistencia del suelo de la zona donde se realiza el sistema de puesta a tierra. Los dos primeros componentes se consideran insignificantes en términos prácticos, ya que son valores muy pequeños que pueden ignorarse. En la Fig 4, se muestra un electrodo de puesta a tierra.

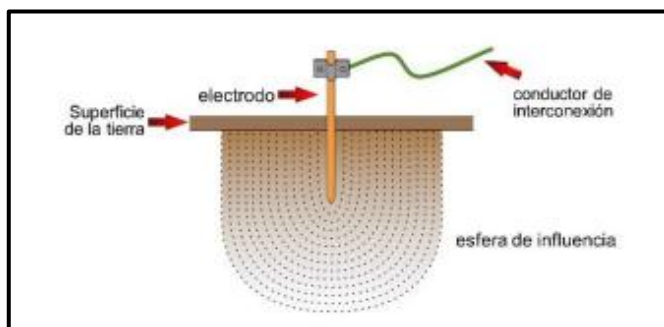


Fig 4. Electrodo de puesta a tierra. [18]

Un punto esencial para tener en cuenta es que, en la realidad, la resistencia del sistema de aterramiento de una línea de transmisión no es constante a lo largo de la misma, sino que varía según la ubicación de cada torre.

Las propiedades del suelo son determinantes para el diseño y la implementación física de un sistema de puesta a tierra, con el objetivo de alcanzar una resistencia específica. Esto implica elegir los tipos de electrodos, que generalmente son múltiples, así como determinar el espaciado y la ubicación adecuada de dichos electrodos. La aplicación de sistemas de puesta a tierra se la realiza en varios componentes del SEP, cada uno con un valor máximo de resistencia de puesta a tierra, esto se muestra en la TABLA I.

TABLA I.

Valor máximo de resistencia de puesta a tierra

Descripción	Resistencia [Ω]
Subestaciones	Alto o muy alto voltaje
	1
	Medio voltaje
	10
Neutro de acometida	Bajo voltaje
	25
Descargas electrostáticas	
Protección contra rayos	4
Alta sensibilidad de equipos electrónicos	5

Nota: en esta tabla se detallan el valor máximo de resistencia del SPAT en componentes del SEP [23]



2.13. Resistividad del suelo

La resistividad del suelo se puede entender como la medida de cuanto resiste o conduce la corriente a través del terreno, medido en una zona específica del suelo, esta magnitud se conoce posterior a realizar unas medidas de en el área de interés; su magnitud se expresa en $\Omega \cdot m$. También se puede describir como la relación entre la diferencia de voltaje en un material y la cantidad de corriente eléctrica que produce en el mismo [1].

La resistividad del suelo varía mucho en todo el mundo debido a la naturaleza heterogénea de la composición del suelo en la mayoría de los casos. En esta variación influyen factores como la composición del suelo, las distintas zonas climáticas y la presencia de electrolitos como agua, minerales y sales. La temperatura es un factor especialmente importante para determinar la resistividad del suelo [13].

2.13.1. Factores que influyen en la resistividad del suelo

La medición de los parámetros del suelo se realiza para adquirir información acerca de la composición de la zona en la que se planea colocar el SPAT. Algunos factores que afectan la resistividad del terreno son, los efectos climáticos, la naturaleza del terreno, el pH (medida de acidez del terreno), sales solubles, la variación del nivel freático y del grado de compactación del material, la temperatura, humedad y estratigrafía, son factores de alta influencia debido a que, de ellos depende que tipo de tratamiento se debe realizar al terreno antes de instalar el sistema de puesta a tierra [20].

La toma de tierra es instalada en las zonas superficiales, y por ello está afectada fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y viento [19].

Lo antes mencionado deriva en que la resistividad posea modificaciones en su valor por los siguientes factores del terreno: [24],

- La composición.
- Las sales solubles existentes y su concentración.
- El estado higrométrico.
- La temperatura.
- La granulometría.



- La estratigrafía.
- La compacidad

2.14. Tipos de suelo

De acuerdo con las características propias de cada terreno, se clasifican en distintos tipos que serán mencionados a continuación:

- **Suelo blando o arcilloso:** A menudo denominado suelo pesado, tiene tendencia a retener una cantidad significativa de agua, lo que da lugar a la formación de charcos. Además, se caracteriza por altos niveles de nutrientes debido a la estrecha afinidad entre las numerosas partículas y minerales presentes en él.
- **Suelo arenoso:** Este tipo de terreno se caracteriza por su incapacidad para retener líquidos, lo que resulta en una superficie áspera y seca al tacto. Las partículas de este terreno están ampliamente separadas entre sí, lo que permite un drenaje rápido. Debido a esta rápida capacidad de drenaje, este tipo de terreno no retiene los nutrientes de manera efectiva.
- **Suelo rocoso:** Estos suelos se caracterizan por ser semi-impermeables y contener formaciones de piedra de varios tamaños en su composición. Son adecuados para la construcción debido a su resistencia, pero presentan baja fertilidad.
- **Suelo uniforme:** Este tipo de suelo es considerado únicamente en casos donde la variación de la resistividad aparente es mínima. Es decir, en situaciones donde el suelo es homogéneo.
- **Suelo no uniforme:** Este tipo de terreno se determina por una amplia variación en las mediciones de resistencia. Es necesario tener en cuenta la resistividad obtenida en las dos capas del suelo utilizando el método de Wenner.

La TABLA II, muestra los tipos de suelo más comunes y el valor de resistividad que poseen.



TABLA II.

Resistividad de los suelos

Tipo de suelo	Resistividad Ωm
Lama	5 - 100
Humus	10 - 150
Limo	20 - 100
Arcillas	80 - 300
Tierra negra	140 - 480
Caliza fisurada	500 - 1000
Caliza compacta	1000 - 5000
Suelo pedregoso desnudo	1 500 - 3 000
Arena común	3000 - 9000
Granito,	1000 - 1500
Rocas	1000 - 10000
Basalto o grava	10000- 20000

Nota: La tabla muestra los diferentes rangos de resistividad, según el tipo de suelo [25]

2.15. Descargas Atmosféricas

Las descargas atmosféricas en los sistemas de transmisión son eventos con alta probabilidad de ocurrencia, debido a que los sistemas de transmisión recorren largas distancias en las que hay zonas con alta presencia de rayos. Para evitar que las interrupciones de servicio eléctrico sean regulares por la existencia de fallas, se implementan sistemas protección, como; la instalación o mejoramiento de sistemas de puesta tierra, mejoramiento del apantallamiento por medio de cables de guarda, mayor longitud en cadenas de aisladores e incluso la instalación de pararrayos de líneas.

Cuando la carga eléctrica acumulada en una nube se transfiere abruptamente hacia otra nube, o hacia la tierra, se producen las llamadas descargas atmosféricas; una descarga hacia la tierra es conocida como rayo, este fenómeno se debe a la presencia de electricidad estática en las nubes [5].

La carga eléctrica que poseen las nubes se genera por la energía estática, teniendo carga positiva y carga negativa, se estima que la nube posee una polaridad positiva en la parte superior y en la parte inferior cuenta con polaridad negativa.



La carga eléctrica se acumula debido a diversos factores, como el rozamiento entre nubes, la colisión de partículas de hielo de distintos tamaños, la influencia de la gravedad, cambios de temperatura, así como corrientes de aire que ascienden y descienden dentro de la nube, entre otras causas.

Con el transcurso del tiempo, las partículas positivas tienden a predominar, mientras que la superficie terrestre posee una carga negativa [13]. Esta disparidad de cargas resulta en la generación de un campo eléctrico en el aire debido al exceso de carga positiva en la atmósfera, es por ello por lo que una vez que la nube se encuentra cargada, comienza a experimentar un proceso en el cual la parte inferior de la nube experimenta pequeñas descargas internas.

Las descargas atmosféricas pueden generar sobrevoltajes y corrientes transitorias, sobre todo en regiones con gran frecuencia de tormentas eléctricas. Estos sobrevoltajes pueden entrar en el sistema eléctrico y causar diversas perturbaciones que pueden dañar los componentes de la red si el sistema de transmisión carece de protección suficiente.

2.16. Descripción del fenómeno de descargas atmosféricas

Cuando un rayo impacta en un cable de guarda, la corriente producida por la descarga atmosférica fluye en ambas direcciones a través del cable. Tanto la corriente como el voltaje viajan por el cable hasta llegar a la torre, donde descienden y encuentran una resistencia conectada al suelo que disipa la energía asociada al fenómeno atmosférico [22]. Este fenómeno es mostrado en la Fig 5.

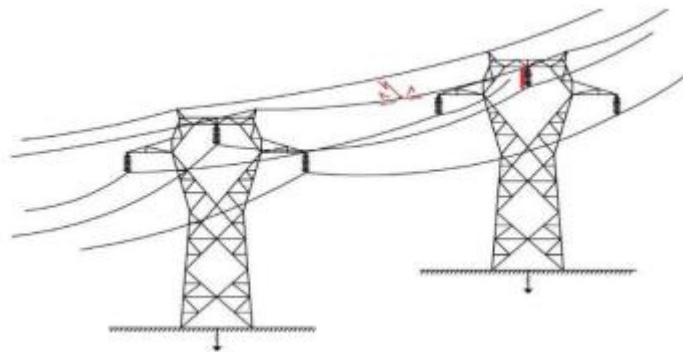


Fig 5. Representación de la descarga atmosférica sobre el cable de guarda [26]



Las torres de transmisión al ser los puntos más altos de un sistema de transmisión son susceptibles a sufrir un alto nivel de incidencia de que las descargas atmosféricas caigan en sus proximidades, dependiendo también del tipo de torre y la masa que posee, la incidencia de las descargas puede ser hasta un 60% mayor que el resto de los componentes. Como es mostrado en la Fig 6.

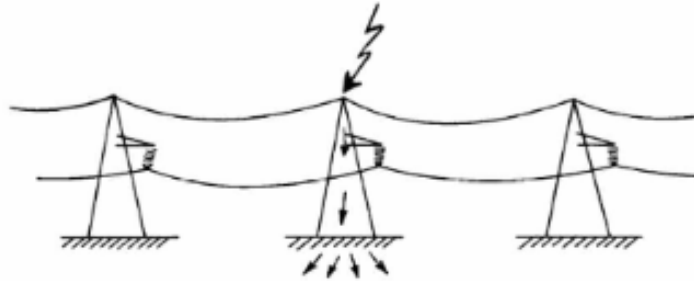


Fig 6. Representación de la descarga atmosférica sobre la torre

2.17. Factores que caracterizan a una descarga atmosférica

Hay diversos factores que definen una descarga atmosférica, siendo los más importantes los siguientes:

- Sobrevoltaje temporal
- Sobrevoltaje transitorio
- Sobrevoltaje conducido
- Sobrevoltaje Inducido

2.17.1. Sobrevoltajes temporales:

Un sobrevoltaje temporal se produce cuando el voltaje aumenta más del 10% de su valor nominal y se mantiene durante varios ciclos. Estos sobrevoltajes suelen ser causados principalmente por defectos de conexión y cortes de neutro [13]. Otras causas son las mencionadas:

- Maniobras (rechazo de carga).
- Fallas.

Puede ser caracterizados por:

- La amplitud menor a 1,5pu



- La frecuencia de oscilación puede ser menor, igual o mayor que la frecuencia fundamental.
- El tiempo de duración es superior a las decenas de milisegundos.

2.17.2. Sobrevoltajes transitorios:

Hacen referencia a sobrevoltajes de corta duración, con amplitud significativamente superior al voltaje nominal. Son de alto riesgo al momento de presentarse, ya que la corriente que se genera es inductiva o capacitiva, el sobrevoltaje transitorio tiene lugar en los primeros 2, 3 o 4 μ s de la descarga atmosférica [27].

Las descargas atmosféricas son la principal causa de sobrevoltajes de frente rápido en los sistemas eléctricos de potencia, aunque también puede ser originadas por maniobras cuando los equipos del sistema eléctrico están ubicados de distancias muy cortas de un interruptor que realiza la maniobra [28].

Estos sobrevoltajes se presentan por el impacto directo de los rayos en los conductores de fase, o por los conocidos flámeos inversos. Cuando un rayo golpea una línea aérea o cae directamente cerca de ella, la corriente del rayo se divide en dos partes iguales, transmitidas como ondas viajeras en ambas direcciones desde el punto de impacto en el conductor.

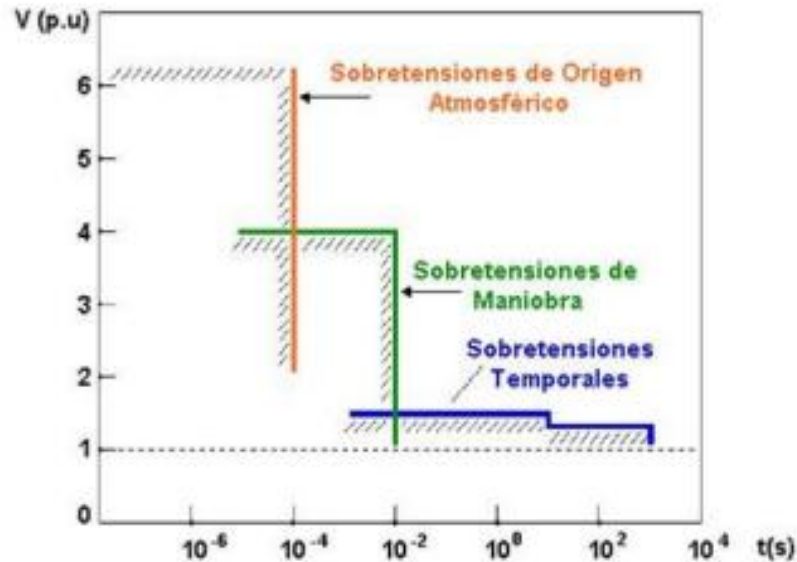


Fig 7. Relación voltaje - tiempo en descargas atmosféricas. [29]

2.18. El Rayo

Un rayo es una descarga eléctrica transitoria de gran intensidad. La mitad de los rayos se producen en el interior de las nubes, mientras que la otra mitad se genera entre la nube y el suelo. El rayo puede ser considerado como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas al mismo tiempo, por lo que es considerado, como una onda bipolar [30].

Al originarse un rayo, primero se genera una descarga conocida como "guía escalonada", que desciende aproximadamente a una velocidad de un sexto de la velocidad de la luz y alcanza una distancia de alrededor de 50m. Luego se detiene durante unos 50 μ s antes de continuar. Repite este proceso de detenerse y avanzar de manera escalonada. La columna del rayo contiene una cantidad sustancial de cargas negativas, lo cual provoca un aumento de la conductividad del aire debido a la ionización causada por estas cargas en movimiento.

Cuando la guía escalonada se encuentra aproximadamente a una altura de 100 m sobre el suelo, ocurre una descarga ascendente desde la tierra para encontrarse con ella. Al establecer



contacto, se forma una conexión entre la nube y la tierra, lo que permite que las cargas de la nube se disipen o escapen [15].



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3. Introducción

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar el efecto del comportamiento de un Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) en torres de transmisión al variar la longitud de contrapesos durante fallas de alta frecuencia. Las descargas atmosféricas son fenómenos críticos que afectan el sistema de puesta a tierra, donde los parámetros inductivos y capacitivos del SPAT ya no pueden ser despreciados como en fenómenos de baja frecuencia. En tales situaciones de alta frecuencia, la resistencia se vuelve menos significativa y estos parámetros adquieren mayor importancia en el diseño del sistema.

La técnica de emplear cables de contrapeso en líneas de transmisión es común y consiste en enterrar conductores desnudos de longitudes significativas, los cuales se conectan horizontalmente a las patas de las estructuras de las torres de transmisión a una baja profundidad superficial, en diversas configuraciones. Sin embargo, muchas de estas configuraciones no cumplen con los parámetros necesarios, lo que resulta en un funcionamiento inadecuado del sistema de puesta a tierra.

La investigación inició con una exhaustiva recopilación bibliográfica de varios autores y normas relacionadas con los sistemas de puesta a tierra en general, centrándose posteriormente en el estudio específico del SPAT en líneas de transmisión. Toda la información recopilada sobre este tema se presenta detalladamente en el Capítulo II, dentro del marco teórico de este trabajo.

Así mismo, se investigaron las diversas configuraciones de contrapesos empleadas en torres de transmisión y las fórmulas usadas para calcular los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia en cada configuración del sistema de puesta a tierra. Estas fórmulas fueron desarrolladas por Sunde, proporcionando un fundamento teórico sólido para el análisis experimental.

El manejo del software ATP se logró a través de métodos bibliográficos y analíticos, que incluyeron el estudio de su interfaz y el funcionamiento de sus modelos, los cuales representan



cada elemento del sistema eléctrico de potencia utilizado en esta investigación. El método experimental se implementó al iniciar las simulaciones, donde se representó la línea de transmisión, las torres, el hilo de guarda, los aisladores y el SPAT con diversas configuraciones de contrapesos.

3.1. Materiales

En esta sección se detallan los materiales utilizados para el desarrollo de la presente investigación de grado, dado que cumplen un papel fundamental para la obtención de resultados requeridos.

3.1.1. ATP

El software ATP es un programa computacional de licencia abierta a los usuarios, empleado en ingeniería para el análisis de componentes eléctricos de alta potencia. El software de Transitorios Alternativos (ATP) sirve para la simulación de sistemas eléctricos, y se enfoca en el estudio de los fenómenos transitorios de características electromagnéticas y electromecánicas, necesarios para la especificación de equipos, diseño de sistemas eléctricos, entre otros [28]. Con este programa digital se pueden simular redes complejas. Posee elevadas capacidades de modelado y características adicionales además del cálculo de transitorios [31].

ATP posee MODELOS que son componentes que se usan para simular los elementos de un sistema eléctrico. La interfaz presenta módulos propios del programa TACS (Análisis transitorio de sistemas de control) y MODELOS (un lenguaje de simulación) permiten el modelado de sistemas de control y componentes eléctricos, es por ello por lo que la red eléctrica también se puede simular utilizando el modelado del sistema de control TACS y MODELOS [24].

El módulo MODELOS en ATP es un lenguaje de descripción de propósito general respaldado por un extenso conjunto de herramientas de simulación, que puede también ser modificada por el usuario para la representación y el estudio de sistemas variables en el tiempo [31].

La biblioteca de modelos de ATP actualmente consta de los siguientes componentes:

1. Elementos R, L, C; agrupados, lineales, acoplados y desacoplados.
2. Líneas y cables de transmisión con parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia.



3. Resistencias e inductancias no lineales, inductor histerético, resistencia variable en el tiempo, resistencia controlada TACS/MODELS.
4. Componentes con no linealidades: transformadores incluyendo saturación e histéresis, descargadores de sobrevoltajes (con y sin espacios), arcos.
5. Interruptores ordinarios, interruptores dependientes del tiempo y del voltaje, conmutación estadística
6. Componentes eléctricos definidos por el usuario que incluyen interacción con MODELOS

El software ATP se emplea generalmente para estudios como:

1. Estudios de sobrevoltaje del rayo
2. Conmutación de transitorios y fallas
3. Estudios estadísticos y sistemáticos de sobrevoltajes.
4. Transitorios muy rápidos en GIS y puestas a tierra.
5. Modelado de máquinas
6. Estabilidad transitoria, arranque del motor.
7. Oscilaciones torsionales del eje
8. Conmutación de transformadores y reactores/condensadores en derivación
9. Ferro resonancia
10. Aplicaciones de electrónica de potencia
11. Servicio de disyuntor (arco eléctrico), corte de corriente
12. Dispositivos FACTS: modelado STATCOM, SVC, UPFC, TCSC
13. Análisis armónicos, resonancias de red.
14. Pruebas de dispositivos de protección

3.2. Metodología

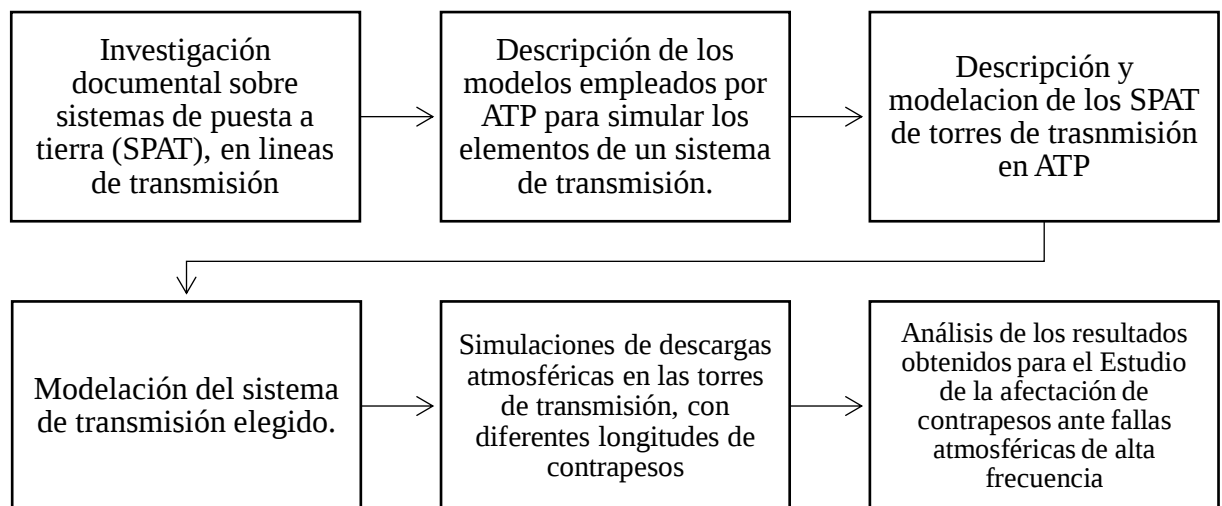
En este capítulo se muestra la información acerca de cómo se realizó el presente trabajo de grado, las características técnicas de las líneas de transmisión, de las torres (estructuras) de las líneas de transmisión y los distintos elementos de un sistema de puesta a tierra, se detalla los modelos utilizados en el software ATP Draw para llegar a los objetivos planteados. Del mismo modo, se describe la metodología usada, en este caso es cuantitativa, ya que los



resultados arrojados son datos analizables, también se indican los métodos investigativos utilizados, los cuales se aplicaron de manera ordenada para avanzar en cada una de las fases establecidas. Estos criterios se complementaron entre sí para lograr la estructura adecuada a lo largo de toda la investigación.

3.3. Procedimiento

Mediante el siguiente diagrama se describe el proceso ejecutado en el Estudio de la afectación de contrapesos en torres de transmisión ante fallas atmosféricas de alta frecuencia.



En el diagrama anterior, se detalla la metodología seguida en el presente estudio, iniciando por la búsqueda documental, es decir, se usó el método bibliográfico, para obtener los fundamentos teóricos correctos y necesarios acerca del tema de investigación.

Consecuentemente la siguiente actividad realizada fue el análisis lógico de los fundamentos teóricos e información encontrada en documentos e investigaciones a lo largo del Capítulo I y II, que permitió determinar conclusiones específicas sobre los parámetros necesarios para la investigación. Los parámetros analizados desde una hipótesis universal fueron; las fórmulas que se ocupan para las distintas configuraciones de contrapesos en torres de transmisión, ya que estos



elementos poseen resistencia, inductancia y capacitancia propia, de acuerdo con la longitud, radio, la resistividad del suelo, la permitividad eléctrica del suelo, la permeabilidad magnética del suelo, y la profundidad de instalación a la que estos se encuentran. Las mencionadas fórmulas para su cálculo fueron declaradas por Sunde.

En la siguiente actividad se usó el método experimental y se desarrolló mediante el software ATP donde se representó los elementos de un sistema eléctrico de transmisión y una descarga atmosférica. A través de una serie de simulaciones en las cuales se definen variables y parámetros que interviene en una línea de transmisión que sufre una descarga atmosférica, se llega a una aproximación del fenómeno con la que se experimenta y analiza los efectos propios del sistema de puesta a tierra, al variar parámetros como la longitud y número contrapesos.

Finalmente, se usó el método comparativo, que posterior a un análisis de los parámetros requeridos, se realizó la presentación de los resultados y conclusiones sobre la longitud de los contrapesos usados en un sistema de puesta a tierra en transmisión y como actúa en las variadas fallas de alta frecuencia.

3.3.1. Investigación documental sobre sistemas de puesta a tierra (SPAT), en líneas de transmisión

Gracias al uso del método bibliográfico, se procedió a la recolección de información en varias fuentes sobre los sistemas de puesta a tierra con presencia de contrapesos en líneas de transmisión, y sobre las fallas de alta frecuencia que los afectan, se ahondó en conocimiento para facilitar el proceso investigativo y se logró obtener información validada que dio un soporte sólido, para desarrollar el presente trabajo de grado.



3.3.2. Descripción de los componentes utilizados

A partir de la identificación de las características de los MODELOS de todos los elementos que componen el sistema de transmisión eléctrica, necesarios para implementar las simulaciones pertinentes en el software ATP. Se detalla a continuación todos los elementos del sistema de transmisión involucrados en los fenómenos producidos por descargas atmosféricas son representados por un componente dentro del software ATP. La TABLA III, indica:

TABLA III.

Elementos del sistema representados en ATP

Elemento del sistema eléctrico	Representación en ATP
Corriente de rayo (descarga atmosférica)	Fuente de impulso Heidler (Type 15)
Línea de transmisión	Modelo Bergeron
Torre de transmisión	Modelo de parámetros distribuidos
Cadena de Aisladores	Bloque ISF
Pararrayos	Resistencia no lineal (Type 92)
Sistema de puesta a tierra	Modelo de parámetros distribuidos

Nota: En esta tabla se muestran los elementos del sistema de transmisión y su representación en ATP

3.3.2.1. Fuente de corriente Heidler

Este tipo de fuente representa la forma de onda de corriente del rayo, en el software ATP, basándose en la norma IEC 62305-1 [32]. Para modelar esta fuente de corriente, se debe ingresar en la opción source, después de dar clic derecho en el espacio de trabajo, y selecciones Heidler type 15. Para este trabajo de grado se usa una corriente con una amplitud de 70 kA, ya que a partir de un análisis exhaustivo se determinó que en Ecuador no existen estudios actualizados sobre cuál es el valor de amplitud que las descargas atmosféricas presentan, varios estudios usan un rango de valores de corriente similares respaldados en bibliografías empleadas.

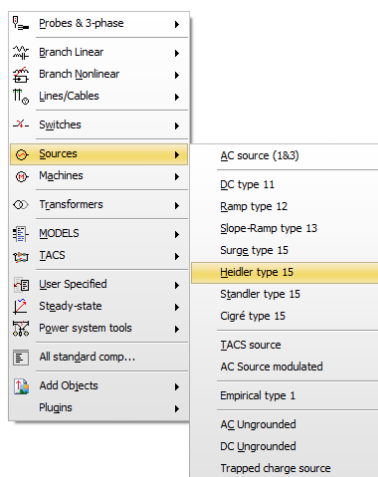


Fig 8. Fuente Hediler en ATP

La Fig 39 establecida en **A**, muestra la representación gráfica de la fuente Heidler en ATP

La fuente tipo Heidler posee una serie de parámetros para un modelamiento adecuado, en la TABLA IV, se enlistan algunos

TABLA IV.

Parámetros de Modelamiento de fuente Heidler

Parámetros de Fuente Heidler	Definición
Amp	Amplitud de onda [A].
T _f	Tiempo de frente de onda en [s]. Intervalo entre t = 0 al tiempo del pico de la función.
Tau	Duración de la descarga en [s]. Intervalo entre t = 0 hasta el punto de la cola donde la amplitud de la función ha decrecido hasta el 37% de su valor pico
n	Factor de influencia de la tasa de crecimiento. Incrementando n se incrementa la máxima pendiente.
T _{start}	Tiempo de inicio en [s]. La fuente tiene un valor cero para un tiempo t < T _{start}
T _{stop}	Tiempo de finalización en [s]. La fuente tiene valor cero para un tiempo t > T _{stop}



Nota: En esta tabla se muestran los parámetros de la fuente Heidler y sus conceptos.

3.3.2.2. Modelos de Líneas de Transmisión

Los componentes principales de las líneas de transmisión son cuatro parámetros, los cuales están interconectados en serie y en paralelo. La resistencia y la inductancia se conectan en serie para formar una impedancia uniformemente distribuida a lo largo de la línea. Por otro lado, la capacitancia y la conductancia se conectan en paralelo [33].

El software ATP posee en el menú de líneas de transmisión una lista de submenús para los distintos tipos de modelos de líneas, los cuales son, mencionados a continuación:

- Modelos de líneas con parámetros concentrados (Lumped).
- Modelos de línea de onda viajera con parámetros distribuidos.
- Modelos de líneas y cables LCC con parámetros distribuidos.

El último modelo es el más utilizado en investigaciones de este ámbito por lo que será elegido para esta investigación

Para acceder al menú de líneas, dar clic derecho en el área de trabajo del software y seleccionar la opción *Lines/Cables* como se muestra en la Fig 9

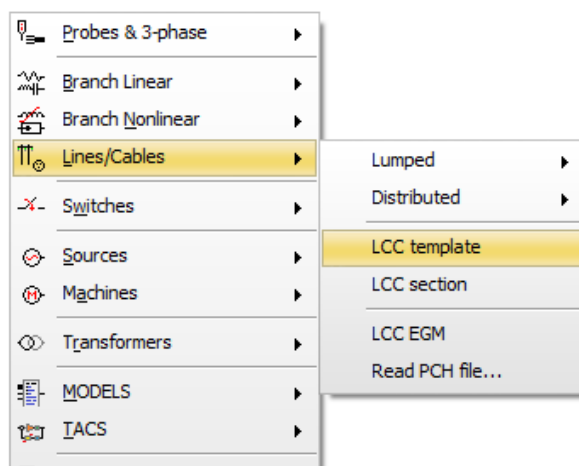


Fig 9. Líneas de transmisión en ATP



Para líneas de transmisión se debe usar la subrutina *LCC template*, y al seleccionarla aparece un cuadro de diálogo donde se observan 3 parámetros principales de configuración: *Model*, *Data* y *Nodes*. Los cuales permiten especificar el número de fases presente en la línea de transmisión elegida, transposición, efecto piel, la resistividad del suelo, valor de frecuencia para el modelo seleccionado y la longitud de la línea.

En la opción *Data* se debe ingresar los parámetros de distribución geométrica de las torres de transmisión, y los parámetros eléctricos de los conductores. Estos parámetros son necesarios en todos los modelos de línea existentes.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	1	0.1	0	10	8	1	0	2
2	2	0	1	0.1	0	10	8	1	0	2
3	3	0	1	0.1	0	10	8	1	0	2

Fig 10. Data de línea de transmisión.

En la TABLA V, se muestran las opciones donde se ubicarán los parámetros de la línea; radio interno del conductor, radio externo, resistencias, distancias horizontales y verticales de los conductores, también la separación y el ángulo que se presentan los conductores.



TABLA V.

Parámetros de la configuración DATA

Parámetros	Definición
Ph.no	Permite ingresar cada una de las fases que presenta la línea. Ph.no = 0 hace referencia a un cable de guarda.
RIn	Radio interno del conductor. Rin =0 hace referencia a un conductor homogéneo.
Rout	Radio externo del conductor.
Resis	valor de resistencia AC o DC del conductor.
Vtower	Altura del conductor (centro del haz de conductores), respecto al suelo.
Vmid	Altura del conductor (centro del haz de conductores), respecto al suelo, en el medio del vano.
Separ	Distancia de separación entre los conductores del haz.
Alpha	Posición angular de uno de los conductores del haz medida en sentido anti-horario respecto a la horizontal.
Horiz	Distancia del conductor (centro del haz de conductores) respecto al eje x
NB	Número de conductores que conforman el haz.

Nota: En esta tabla se indican los parámetros de la configuración DATA de la línea de transmisión y sus conceptos [28]

Para este caso de estudio, los datos de la línea de transmisión ocupada se detallan en la Fig 11, los cuales se extraen del datasheet de los conductores y cable de guarda usados, estos valores se encuentran en la TABLA XVIII y TABLA XIX, respectivamente detalladas en la sección de **A**. Los datos de **Vtower**, **Vmid** y **Horiz** son usados a partir de la geometría de la torre empleada.



Line/Cable Data: line

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0	1.4111	0.067	-4.9	31.2	19.2
2	2	0	1.4111	0.067	-4.9	24.2	12.2
3	3	0	1.4111	0.067	-4.9	17.2	5.2
4	4	0	1.4111	0.067	4.9	17.2	5.2
5	5	0	1.4111	0.067	4.9	24.2	12.2
6	6	0	1.4111	0.067	4.9	31.2	19.2
7	7	0	0.477	2.36	-5.5	38	26
8	8	0.28	0.56	0.485	5.5	38	26

Fig 11. Datos de línea LCC usada en la simulación

En la opción *model type* se encuentran los diferentes modelos de las líneas que se puede elegir, de acuerdo con el estudio realizado, a continuación, se detalla el modelo Bergeron usado en esta investigación

3.3.2.2.1. Modelo de parámetros constantes distribuidos Bergeron.

Es un modelo elaborado por Hermann Dommel, se fundamenta en fenómenos de difusión de ondas viajeras presentes en la línea de transmisión, usando parámetros constantes y distribuidos a lo largo de la línea L' y C' [33], los cuales se distribuyen a lo largo de toda la línea simulada. Si el caso de estudio presenta múltiples fases, estas son analizadas mediante una descomposición modal, con el objetivo de estudiar cada modo como una línea monofásica [28].

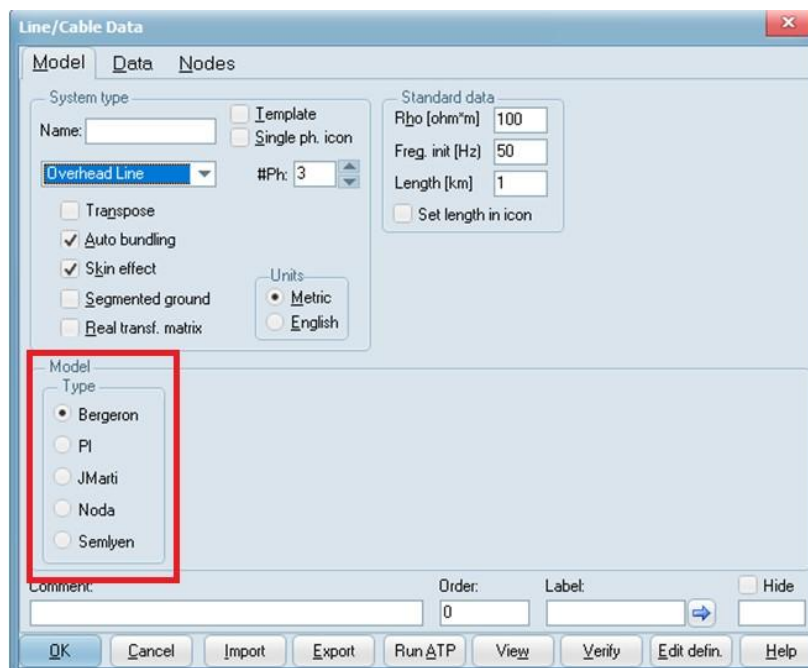


Fig 12. Modelo Bergeron de la línea de transmisión

3.3.2.2.2. Modelo de parámetros concentrados constantes PI

Este modelo es el que está destinado a utilizarse para líneas cortas de transmisión, donde se simulan fenómenos de estado estacionario a la frecuencia propia de la red (60 Hz) [33], [34]. El circuito PI para una línea de transmisión se representa en la Fig 13

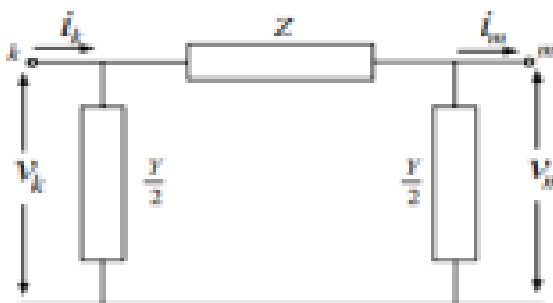


Fig 13. Circuito equivalente del modelo PI de un vano de una línea de transmisión. [33]



3.3.2.3. Modelo de parámetros distribuidos dependiente de la frecuencia JMarti

Este modelo es considerado el más preciso para analizar transitorios, ya que utiliza parámetros que dependen de la frecuencia. A través de funciones racionales, se aproxima la constante de propagación y la impedancia característica de la línea. Usando una matriz de transformación constante, se convierten los valores del dominio modal al dominio factorial. Sin embargo, este modelo no es muy preciso cuando se lo ocupa a frecuencias muy bajas y con secciones de línea muy cortas [35]. La Fig 14 muestra las características que se puede ingresar en el modelo.

NAME	DEFAULT	VALUE
Idebug	1	1
Ipunch	0	0
Koutpr	0	0
Gmode	3e-8	3e-8

Fig 14. Modelo JMarti en ATP Draw

3.3.2.3. Cadena de Aisladores (Bloque ISF)

La cadena de aisladores es un conjunto de aisladores, generalmente las líneas de transmisión usan cerámicos, de cristal, o de polímeros. Los aisladores están sujetos a las estructuras y sostienen a los conductores. Cumplen dos objetivos primordiales.



- Aislar eléctricamente de forma permanente para evitar la derivación de la corriente de la línea hacia tierra en cualquier condición, como en las siguientes situaciones:
 - Sobrevoltajes temporales,
 - Sobrevoltajes de maniobra
 - Sobrevoltajes transitorios (descargas atmosféricas).
- Soportar a los conductores eléctricos para garantizar que no se muevan en sentido longitudinal ni transversal [36].

Es importante mencionar que en este trabajo se empleó como aislador el bloque ISF un modelo propio de ATP que se constituye de un interruptor y un medidor de voltaje en la Fig 15 se muestra la disposición de elementos del bloque ISF

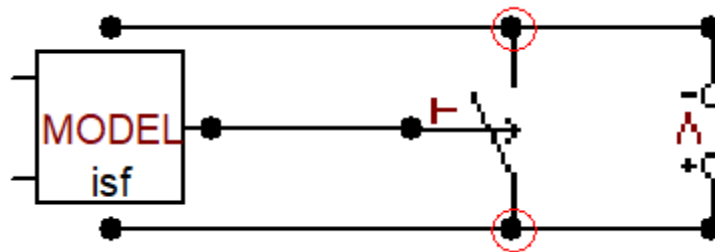


Fig 15. Componentes del aislador ISF

El aislador ISF dentro de su programación presenta distintos modos de actuación, para las simulaciones se empleó el modo 1, la Fig 16, muestra el código que permite cerrar el interruptor cuando el valor de sobrevoltaje supera al valor de voltaje disruptivo del mismo, mostrando un valor de 0 voltios en las curvas de sobrevoltaje de la fase afectada, lo que ATP representa como un *backflashover*, esto está respaldado por varias normas como la IEC 60071-4 [37]. El único parámetro que se puede variar en este bloque ISF es la distancia de la cadena de aisladores y la distancia de arco seco en este estudio es de 3m.



```

IF (MS=1) THEN                                --Volt-time curve

  IF (t<>0 AND CLOSE=0) THEN
    TT:=TT+timestep                            --Current time is seconds
    TIME:=TT*10**6                             --Current time in microseconds
    FLASH:=(C1+(C2/(TIME**0.75)))*1000         --Flashover voltage in V
    IF (U>=FLASH) THEN
      CLOSE:=1                                --Flashover
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF

```

Fig 16. Programación Modo 1 del aislador ISF

3.3.2.4.Resistencia no lineal type 92

Un descargador es un elemento que tiene la función de no conducir voltajes en operación normal y permite conducir corrientes en el momento cuando aparece una falla en el sistema eléctrico de potencia especialmente causadas por descargas atmosféricas. Para que este elemento funcione correctamente es necesario que posea una característica de voltaje-corriente con la cual se necesita una resistencia muy alta en operación normal y una resistencia muy baja en caso de aparición de sobre el voltaje transitorios. La resistencia no lineal type 92 cuenta con esta característica por lo cual es utilizada en este estudio.

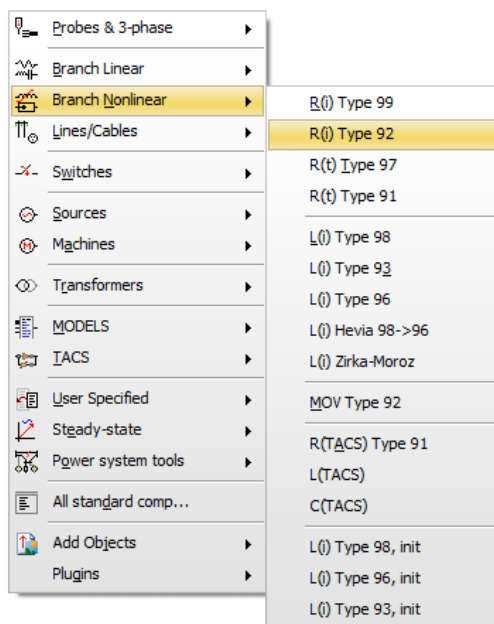


Fig 17. Resistencia no lineal type 92 (Descargadores de sobrevoltaje)



3.3.2.5. Sistema de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra en torres de transmisión tienen una característica general, que es el uso de contrapesos conectados horizontalmente en las patas de la estructura, en configuraciones varias, que se implementan en función de la resistividad del terreno de la zona de estudio. En la mayoría de bibliografía empleada en este trabajo se detalla que las configuraciones más comunes son la de dos, cuatro y seis contrapesos en una torre de transmisión, del mismo modo las longitudes efectivas son la de 50m y 80m, tomando en cuenta la resistividad del suelo, y la configuración elegida.

Según la configuración de contrapesos usados en una torre de transmisión existen fórmulas, propuestas y descritas por Sunde [38].

3.3.2.5.1. Configuración de 2 contrapesos

Esta configuración se caracteriza por tener un electrodo de entrada, y uno de salida en la torre de transmisión, es decir solo ocupa dos de las cuatro patas de la torre, enterrados a 60 cm de profundidad. Aquí se propone que, para un electrodo horizontal, los parámetros R, L y C se muestran a continuación.

Donde

R: Resistencia

L: Inductancia

C: Capacitancia

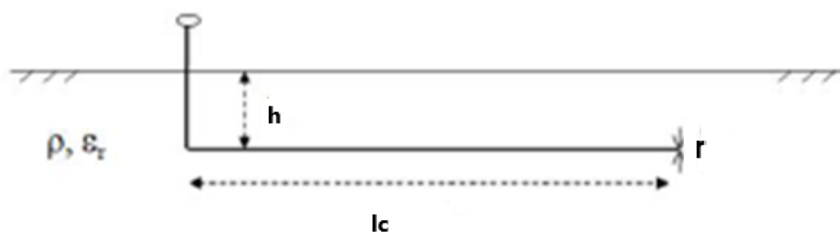


Fig 18. Disposición de un contrapeso horizontal [39]



$$R = \frac{\rho}{\pi lc} \left[\ln\left(\frac{2lc}{\sqrt{2rh}}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$L = \frac{\mu lc}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2lc}{r}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$C = \frac{\rho \epsilon_r \epsilon_o}{R} \quad (3)$$

Donde:

ρ : resistividad del suelo.

ϵ_o : permitividad eléctrica del suelo.

μ : permeabilidad magnética del suelo.

Con respecto al contrapeso:

lc : longitud del contrapeso.

r : radio

h : profundidad de instalación [39].

En la Fig 19 se muestra la configuración de 2 contrapesos horizontales

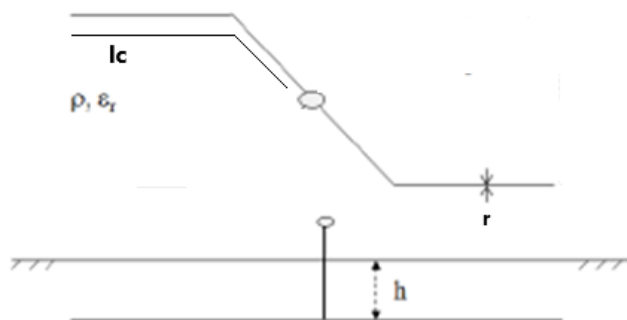


Fig 19. SPAT de 2 contrapesos

3.3.2.5.2. Configuración de 4 contrapesos

El caso de 4 cuatro contrapesos en el sistema de puesta tierra se caracteriza por presentar dos contrapesos de entrada y dos contrapesos de salida, es decir las 4 patas de la torre de transmisión poseen contrapesos, como se muestra en la Fig 20 poseen cuatro contrapesos enterrados a 60 cm de la superficie. Para el caso de múltiples



electrodos de tierra horizontales, en particular de 4 contrapesos, los parámetros mutuos vienen dados por:

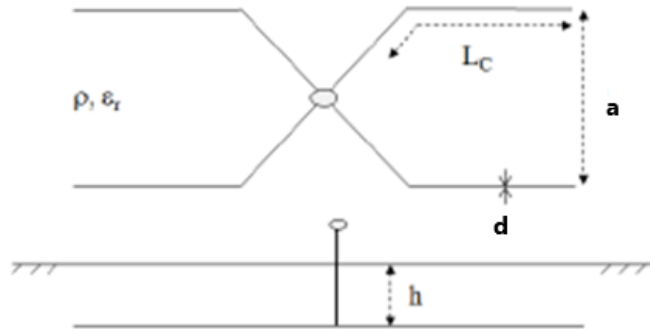


Fig 20. Disposición de 4 contrapesos, con parámetros mutuos [39]

$$RM = \frac{\rho}{\pi lc} \left[\ln\left(\frac{2lc}{\sqrt{2}dh}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$LM = \frac{\mu lc}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2lc}{d}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$CM = \frac{\rho \epsilon_r \epsilon_o}{RM} \quad (6)$$

$$d = \sqrt{r * a \left(\frac{a}{2h}\right)} \quad (7)$$

Donde:

RM: Resistencia mutua.

LM: Inductancia mutua.

CM: Capacitancia mutua.

ρ : resistividad del suelo.

ϵ_o : permitividad eléctrica del suelo.

ϵ_r : permitividad relativa del suelo.

μ : permeabilidad magnética del suelo.

Con respecto al contrapeso:

a: distancia entre contrapesos paralelos

lc: longitud del contrapeso.

d: radio equivalente del contrapeso



r: radio

h: profundidad de instalación [39].

3.3.2.5.3. Configuración de 6 contrapesos

La configuración de 6 contrapesos en un sistema de puesta se caracteriza por presentar 3 contrapesos de entrada y 3 contrapesos de salida, ocupando las 4 patas de la torre de transmisión, sumado un contrapeso en la mitad de los dos contrapesos de cada lado de la torre, en la Fig 21 se puede apreciar esta configuración. Para el caso de múltiples electrodos de tierra horizontales, en particular de 6 contrapesos, los parámetros mutuos vienen dados por

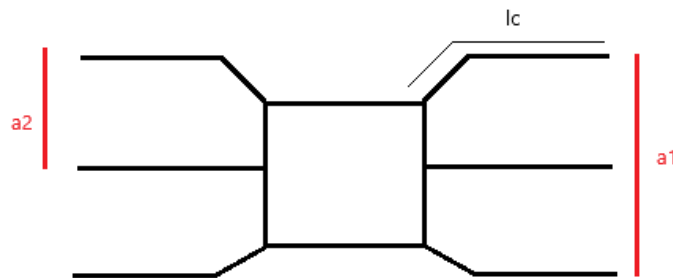


Fig 21. Disposición de 6 contrapesos con parámetros mutuos

$$RM = \frac{\rho}{\pi lc} \left[\ln\left(\frac{2lc}{\sqrt{2dh}}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$LM = \frac{\mu lc}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2lc}{d}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$CM = \frac{\rho \epsilon_r \epsilon_o}{RM} \quad (6)$$

$$d = \sqrt{r * a \left(\frac{a}{2h}\right)} \quad (7)$$

Donde:

RM: Resistencia mutua.

LM: Inductancia mutua.

CM: Capacitancia mutua

ρ : resistividad del suelo.

ϵ_o : permitividad eléctrica del suelo.



ϵ_r : permitividad relativa del suelo.

μ : permeabilidad magnética del suelo.

Con respecto al contrapeso:

a: distancia entre contrapesos paralelos

l_c : longitud del contrapeso.

d: radio equivalente del contrapeso

r: radio

h: profundidad de instalación [39].

3.3.3. Modelación del sistema de transmisión en el software ATP

La simulación del trabajo de titulación consta de cuatro torres de transmisión, que son estructuras de suspensión de celosía, de doble terna trifásica con doble cable de guarda para 230 kV. Cada de torre tiene definida; valores de altura total de la torre, altura de los conductores, altura de los cables de guarda, longitud de sus brazos, separación entre fases, separación entre ternas, separación entre cables de guarda, mostrados en la TABLA XX en la sección A En la Fig 22 se muestra la representación gráfica de las estructuras de soporte empleadas.

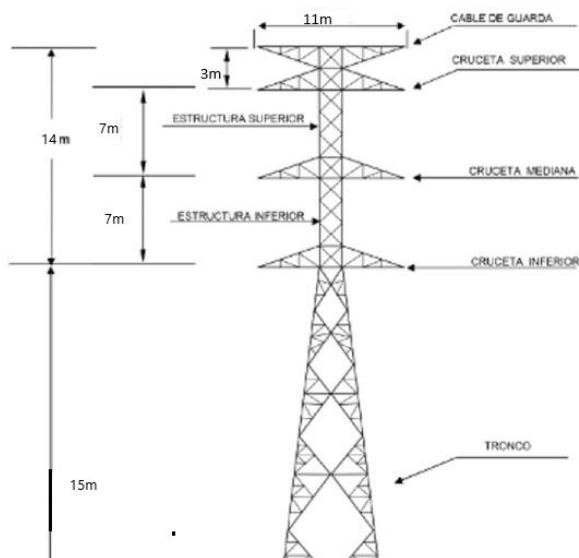


Fig 22. Estructura de suspensión de doble terna con doble cable de guarda 230kV [40]



En el software ATP el modelamiento de una torre de transmisión está determinado por la unión de una impedancia, una resistencia y una inductancia, por cada brazo de la torre, en este estudio por emplear una torre trifásica con cable de guarda, existen 4 grupos de impedancia, resistencia e inductancia, en la Fig 23, se puede apreciar lo antes mencionado. Los valores de Z , R y L propios de la torre utilizada en este estudio se detallan en la TABLA XXIII en la sección A.

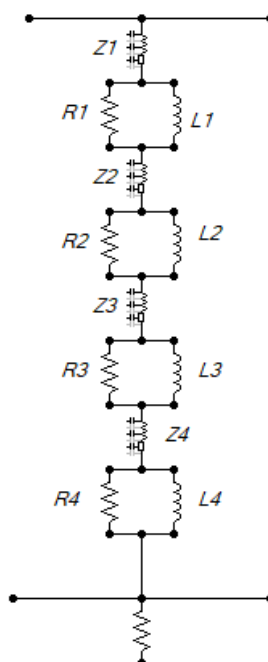


Fig 23. Modelamiento de la torre de transmisión en ATP

También, la línea de transmisión es representada mediante el modelo Bergeron, y se determinó al igual que la amplitud de rayo, por la bibliografía empleada que el valor de frecuencia del rayo es de 100 kHz, la línea posee valores de resistencia de los conductores y cables de guarda definidos por sus datasheet, los cuales se muestran en la Anexo E

TABLA XXI en la sección A La longitud de cada vano se ingresa manualmente en el software, la Fig 24, muestra el interfaz donde se ingresa el valor de longitud propio de cada vano, y la TABLA XXII., en la sección A muestra las longitudes utilizadas en este estudio.



Reference to LCC template: LCC_

Attributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Length	km	0.175	IN1-3	ABC	X0003
Frequency	Hz	100000	IN4-6	ABC	X0004

Fig 24. Interfaz de ATP, donde se ingresa la longitud del vano de la línea de transmisión.

En la Fig 25, se puede observar la simulación realizada en el software ATP, con el modelo del sistema de puesta a tierra, la línea de transmisión escogida y 3 de las 4 torres simuladas. También se observa la fuente tipo Heidler, que simula una descarga atmosférica, otro elemento importante, es el par de fuentes de voltaje, para cada una de las ternas trifásicas de esta línea de transmisión, las cuales simulan las subestaciones que existen en el sistema eléctrico de potencia del país

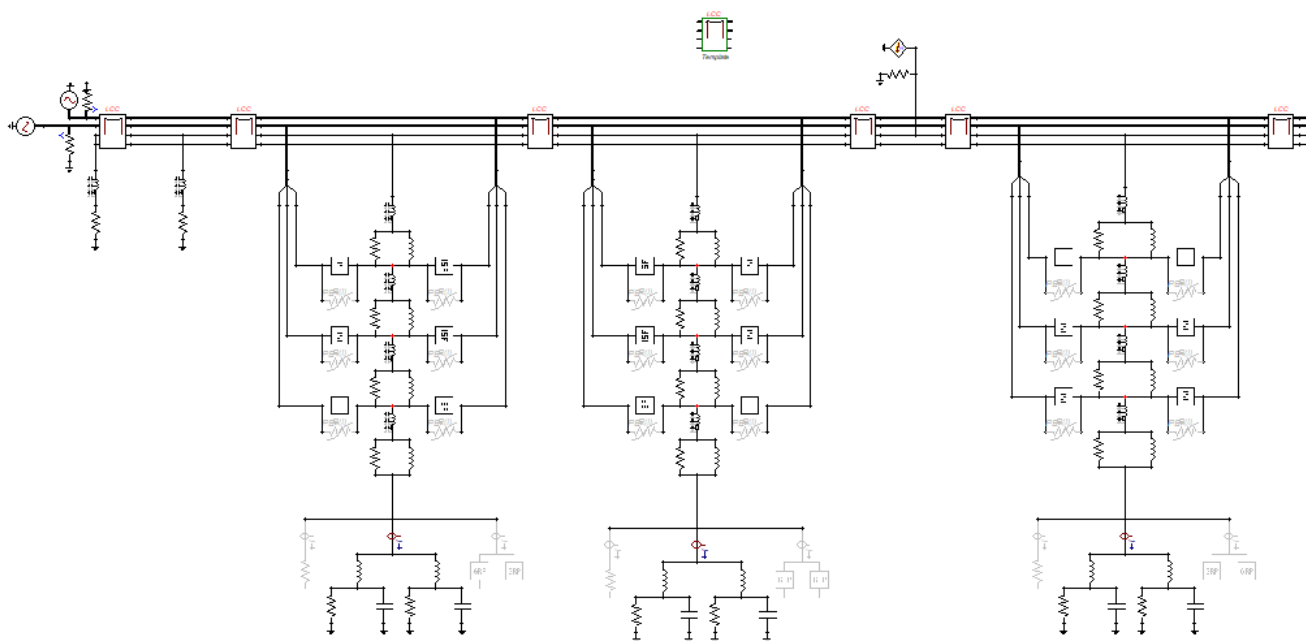


Fig 25. Simulación en ATP de la línea de transmisión escogida

En este estudio para el SPAT se simuló el modelo puramente resistivo utilizado en fenómenos de baja frecuencia, el modelo de parámetros concentrados y el modelo de parámetros distribuidos (secciones pi en cascada). Este último modelo es el que se eligió para el análisis en el trabajo de titulación debido a que en este modelo se toma en cuenta los valores de capacitancia, reactancia y resistencia de los contrapesos y representa de



manera más real el accionar del SPAT frente a descargas atmosféricas. En el software ATP, el sistema de puesta a tierra tiene el mismo modelado (construcción) para las distintas configuraciones de contrapesos, lo que permite determinar si es una configuración de 2, 4 o 6 contrapesos son los valores de resistencia, inductancia y capacitancia, que se calculan mediante el uso de las fórmulas; (1), (2), (3), (4), (5) y (6), mostradas en las páginas 54 y 55.

En la Fig 26 se indica el simulado de cada modelo de puesta a tierra en el software ATP, para apreciar la diferencia de componentes presentes de cada uno.

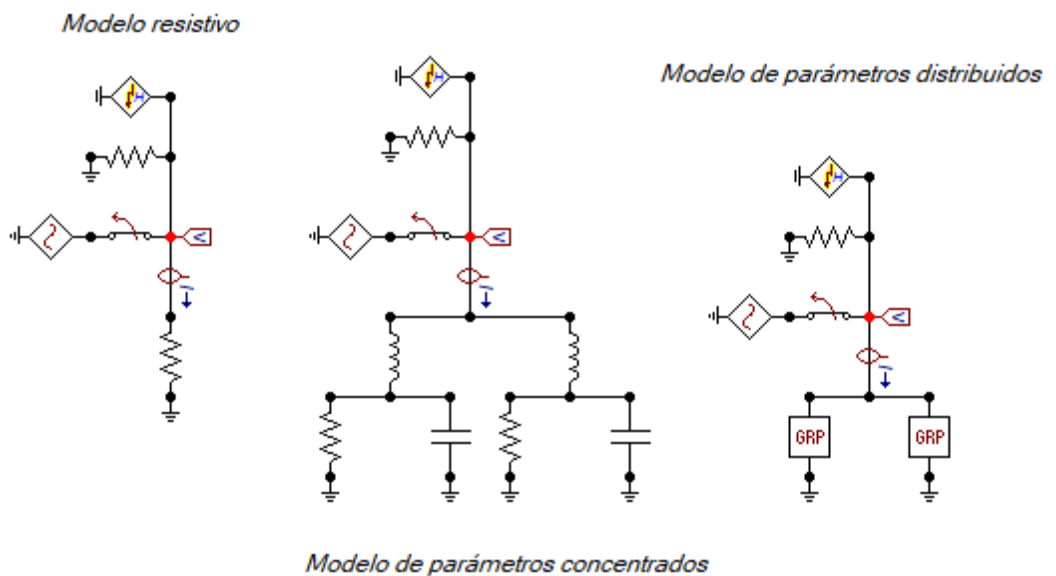


Fig 26. Modelos de sistemas de puesta a tierra en torres de transmisión

3.3.4. Simulaciones de descargas atmosféricas en las torres de transmisión, con diferentes longitudes de contrapesos

Los valores de longitud de contrapeso usados fueron de 50m y 80m, como ya se mencionó son las más usados en el tipo de configuraciones de SPAT en la mayoría de bibliografía empleada en este estudio, es necesario mencionar que en cada una de las longitudes ocupadas los valores de resistencia, inductancia y capacitancia del SPAT fueron



distintas, por tal motivo, la misma magnitud de corriente de rayo (70 kA) ocasionó distintos fenómenos entre las dos longitudes de contrapesos empleadas.

3.3.4.1. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 2 contrapesos

Con el fin de verificar el funcionamiento de un sistema de puesta a tierra con una configuración de 2 contrapesos de 50m cada uno, en una de las torres de transmisión, se simuló un impacto de rayo en los cables de guarda de la línea de transmisión con una magnitud de 70 kA, con una resistividad del suelo de $800 \Omega \cdot m$, en la TABLA VI se muestran los valores usados en esta simulación.

TABLA VI.

Valores usados en la simulación de 2 contrapesos.

Parámetros	Valores
Frecuencia del sistema, f [Hz]	60
Permitividad del espacio libre, ϵ_0 [F/m]	8,85E-12
Permitividad relativa del terreno, ϵ_r	10
Permeabilidad del espacio libre, μ_0 [H/m]	1,26E-06
Permeabilidad relativa del terreno, μ_r	1
Resistividad del terreno [Ωm]	800
Longitud del contrapeso, l [m]	50
Profundidad de instalación, d [m]	0,6
Radio del electrodo, a [m]	0,00715
Número de secciones PI en cascada	18

Nota: En esta tabla se indican los valores de los datos usados en la simulación de puesta a tierra de 2 contrapesos

Los parámetros propios del sistema de puesta a tierra de 2 contrapesos de 50m de longitud se calculan mediante la aplicación de las fórmulas: (1), (2) y (3) mostradas en la sección 3.3.2.5.1 **Configuración de 2 contrapesos**, donde, remplazando los datos requeridos mostrados en la TABLA VI en las fórmulas los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia, en este caso, se muestran en la TABLA VII



TABLA VII.

Parámetros R, L, C, propios del SPAT de 2 contrapesos de 50 metros

Longitud, l [m]	Resistencia, R [Ω]	Inductancia, L [mH]	Capacitancia, C [μ F]
50	548,6030432	4,745E-03	1,29E-04

Nota: En esta tabla se muestran los resultados de R, L y C, posterior a la aplicación de las fórmulas.

En el caso de la configuración de 2 contrapesos de 80m, se siguió el mismo proceso y se usaron los mismos valores expresados en la TABLA VI, con la diferencia que en esta simulación la longitud empleada es la expresada al inicio del párrafo.

Los parámetros propios y mutuos del sistema de puesta a Tierra de 2 contrapesos de 80 metros se calculan mediante la aplicación de las fórmulas: (1), (2) y (3) mostradas en la sección 3.3.2.5.1 **Configuración de 2 contrapesos**, y posterior a remplazar los datos requeridos mostrados en TABLA VI, en las fórmulas los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia, en este caso, se muestran en la TABLA VIII

TABLA VIII.

Parámetros R, L, C, propios del SPAT de 2 contrapesos de 80 metros

Longitud, l [m]	Resistencia, R [Ω]	Inductancia, L [mH]	Capacitancia, C [μ F]
80	369,8061263	8,010E-03	1,91E-04

Nota: En esta tabla se muestran los resultados de R, L y C, posterior a la aplicación de las fórmulas.

3.3.4.2. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 4 contrapesos

Con el objetivo de comprobar el desempeño de un sistema de tierra con 4 contrapesos de 50m cada uno, en una de las torres de línea de transmisión, se llevó a cabo una simulación, en la cual el impacto de un rayo con una magnitud de 70 kA, se dio en los cables de guarda, se considera una resistividad del suelo de $1400 \Omega \cdot m$, y los valores utilizados en esta simulación se presenta en la TABLA IX



TABLA IX.

Parámetros usados en la simulación de SPAT de 4 contrapesos

Parámetros	Valores
Frecuencia del sistema, f [Hz]	60
Permitividad del espacio libre, E_0 [F/m]	$8,85E-12$
Permitividad relativa del terreno, E_r	10
Permeabilidad del espacio libre, u_0 [H/m]	$1,26E-06$
Permeabilidad relativa del terreno, u_r	1
Resistividad del terreno [Ohm m]	1400
Longitud del contrapeso, l [m]	50
Profundidad de instalación, h [m]	0,6
Radio del electrodo, r [m]	0,00715
Número de secciones PI en cascada	18
Distancia de separación d , [m]	40

Nota: En esta tabla se indican los valores de los datos usados en la simulación de puesta a tierra de 4 contrapesos

Los parámetros mutuos del sistema de puesta a Tierra de 4 contrapesos de 50m se calculan mediante la aplicación de las fórmulas: (4), (5) y (6) mostradas en la sección 3.3.2.5.2 **Configuración de 4 contrapesos**, luego de remplazar los datos requeridos mostrados en la TABLA IX en las fórmulas los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia mutua se muestran en la TABLA X.

TABLA X.

Parámetros R, L, C mutuos del SPAT de 4 contrapesos de 50 metros

Longitud, l [m]	Resistencia, R [Ω]	Inductancia, L [mH]	Capacitancia, C [μ F]
50	473,2950	$1,376E-03$	$2,6178E-04$

Nota: En esta tabla se muestran los resultados de RM, LM y CM, posterior a la aplicación de las fórmulas

Para el SPAT de 4 contrapesos ahora de 80 metros, se aplicó el mismo procedimiento y se emplearon los mismos valores indicados en la TABLA IX, pero en esta simulación la longitud del contrapeso utilizada es la mencionada al principio de este párrafo.

Los parámetros mutuos del sistema de puesta a Tierra de 4 contrapesos se calculan mediante aplicación de las fórmulas: (4), (5) y (6) las cuales se muestran en la sección 3.3.2.5.2



Configuración de 4 contrapesos. Donde reemplazando los datos pertinentes en dichas fórmulas con los datos de la TABLA IX, pero teniendo en cuenta que la longitud ahora es de 80m, entonces los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia mutua se muestran en la TABLA XI

TABLA XI.

Parámetros R, L, C, mutuos del SPAT de 4 contrapesos de 80 metros

Longitud, l [m]	Resistencia, R [Ω]	Inductancia, L [mH]	Capacitancia, C [μ F]
80	342,9355	2,619E-03	3,6129E-04

Nota: En esta tabla se muestran los resultados de RM, LM y CM, posterior a la aplicación de las fórmulas

3.3.4.3. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 6 contrapesos

Con la finalidad de evaluar el funcionamiento de un sistema de puesta a tierra con 6 contrapesos de 50m de longitud cada uno, instalados las torres de una línea de transmisión, se realizó una simulación. En esta ocasión, se consideró el impacto de un rayo de 70 kA sobre los cables de guarda, con una resistividad del suelo de $1800 \Omega \cdot m$. Los valores de los distintos parámetros utilizados en esta simulación se presentan en TABLA XII

TABLA XII.

Valores de los parámetros usados en el SPAT de 6 contrapesos

Parámetros	Valores
Frecuencia del sistema, f [Hz]	60
Permitividad del espacio libre, ϵ_0 [F/m]	8,85E-12
Permitividad relativa del terreno, ϵ_r	10
Permeabilidad del espacio libre, μ_0 [H/m]	1,26E-06
Permeabilidad relativa del terreno, μ_r	1
Resistividad del terreno [Ωm]	1800
Longitud del contrapeso, l [m]	80
Profundidad de instalación, d [m]	0,6
Radio del electrodo, a [m]	0,00715
Distancia de separación, a12 [m]	20
Distancia de separación, a13 [m]	40
Distancia de separación, a23 [m]	20



Número de secciones PI en cascada	18
-----------------------------------	----

Nota: En esta tabla se indican los valores de los datos usados en la simulación de puesta a tierra de 6 contrapesos

Los parámetros mutuos del sistema de puesta a Tierra de 6 contrapesos se calculan mediante la aplicación de las fórmulas: (4), (5) y (6) mostradas en la sección **3.3.2.5.3 Configuración de 6 contrapesos**, donde reemplazando los datos pertinentes en dichas fórmulas con los datos de la TABLA XII, los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia mutua se muestran en la TABLA XIII

TABLA XIII.

Parámetros R, L, C mutuos del SPAT de 6 contrapesos de 50 metros

Longitud, l [m]	Resistencia, R [Ω]	Inductancia, L [mH]	Capacitancia, C [μ F]
50	463,3916	5,9432E-04	3,4377E-04

Nota: En esta tabla se muestran los resultados de R, L y C en esta configuración de contrapesos posterior a la aplicación de las fórmulas

Para el SPAT de 6 contrapesos ahora de 80 metros, se aplicó el mismo procedimiento y se emplearon los mismos valores indicados en la TABLA XII, pero en esta situación se usa la longitud mencionada al inicio del párrafo.

Los parámetros mutuos del sistema de puesta a Tierra de 6 contrapesos se calculan mediante aplicación de las fórmulas: (4), (5) y (6) mostradas en la sección **3.3.2.5.3 Configuración de 6 contrapesos**, y se reemplazan los datos pertinentes en las fórmulas con los datos de la TABLA XII, pero tomando en cuenta que la longitud es de 80m, entonces los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia mutua se muestran en la TABLA XIV:

TABLA XIV.

Parámetros R, L, C mutuos del SPAT de 6 contrapesos de 80 metros

Longitud, l [m]	Resistencia, R [Ω]	Inductancia, L [mH]	Capacitancia, C [μ F]
80	350,2105	1,3685E-03	4,5487E-04

Nota: En esta tabla se muestran los resultados de RM, LM y CM, posterior a la aplicación de las fórmulas



En este capítulo III se detalló la metodología seguida para el caso de estudio, paralelamente a la metodología se describieron los métodos investigativos que se ocuparon para realizar y cumplir con las actividades que se plantearon para conseguir los objetivos mencionados en el Capítulo I. También se detallaron los modelos elegidos y usados en la investigación dentro del software ATP Draw, en los cuales se explican las características técnicas que fundamentan su uso para modelar los componentes eléctricos de un sistema de transmisión. Un punto importante en este capítulo son las fórmulas que determinan la resistencia, inductancia y capacitancia, van a poseer los contrapesos, de acuerdo con la configuración; de dos, cuatro y seis contrapesos que se simuló. También se muestra la aplicación de cada una de las fórmulas con los datos propios del sistema de puesta a tierra.



CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se analizan los resultados de la modelación de las descargas atmosféricas propuestas en esta investigación acorde a las configuraciones detalladas en el Capítulo III recalando que las longitudes de 50m y 80m son las longitudes de contrapesos mayormente utilizadas en la bibliografía ocupada en este trabajo de grado. Se analizó como actuó el SPAT de las torres modeladas, luego de producirse la falla de alta frecuencia en el vano de la línea de transmisión. En el Capítulo III se determinó valores de resistividad del suelo de 800, 1400 y 18000 $\Omega \cdot m$, para las configuraciones de 2, 4 y 6 contrapesos respectivamente, ya que posterior a la recolección de información y análisis de la misma se concluyó que a una mayor resistividad del suelo se deben usar más contrapesos, dado que, la resistencia del sistema de puesta a tierra es directamente proporcional al valor de resistividad del suelo, y esto está determinado por la fórmula (1) y (4) mencionadas en la página 54 y 55 respectivamente. Es de vital importancia mencionar que en este trabajo de grado se usó como aislador el bloque ISF, el cual posee varios modos de actuación en su código de programación, en este caso el modo empleado es el modo 1, y único parámetro que se varió en ATP es la distancia de la cadena de aisladores y fue 3m. Esto está respaldado por la norma IEC 60071-4.

4.1 Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 2 contrapesos de 50m

En la Fig 27 se presenta los valores ingresados en el software ATP, específicamente, los parámetros R, L, C con una longitud de 50m en los contrapesos luego de aplicar las fórmulas necesarias, juntamente con el valor de corriente de rayo usado, los valores ingresados se encuentran calculados en la TABLA VII. Con estos valores se procedió a simular la descarga atmosférica en el software.



NAME	EXPRESSION
R2	548.6
L2	4.745E-3
C2	1.29E-4
IRAYO	70.*1000.
TIME	0.154*((IRAYO/1000.)*0.624)/100

Fig 27. Variables R, L, C de 2 contrapesos de 50m y valor de corriente de rayo en ATP

En este caso, posterior a la simulación de la descarga atmosférica, se determinó que el sistema de puesta a tierra de 2 contrapesos de 50 metros de longitud no logró dispersar adecuadamente la corriente de falla hacia el suelo, esto se comprueba al observar que se generó un *backflashover*, es decir, un sobrevoltaje que superó el voltaje disruptivo del aislador ISF, lo que provocó que el aislador se comporte como un interruptor cerrado (conductor), permitiendo que este sobrevoltaje circulé a través del aislador hacia la fase C de la primera terna trifásica a los 1,905 μ s de presentarse la falla de alta frecuencia resultando en la no existencia de diferencia de potencial entre estos dos elementos, motivo por el cual el valor de voltaje es de 0. Esto se evidencia en la Fig 28; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde la fase afectada (v: X001C-EST_2C), representada en color azul claro, presenta un valor de 0 voltios, así es como el software ATP representa un *backflashover*. Para un mejor entendimiento en las curvas de sobrevoltajes se puede observar un punto rojo, el cual indica una posición; el **eje x** representa el tiempo en μ s y el **eje y** que representa el valor de voltaje en MV. A partir del gráfico, se determinó que esta configuración no cumple el objetivo de disipación del SPAT, por eso luego de producida esta falla de alta frecuencia la línea de transmisión se desconectará por acción de las protecciones instaladas. Por otro lado, el mayor sobrevoltaje en este caso es la de la fase C de la segunda terna trifásica con un valor de 1,19 MV a los 4,25 μ s.

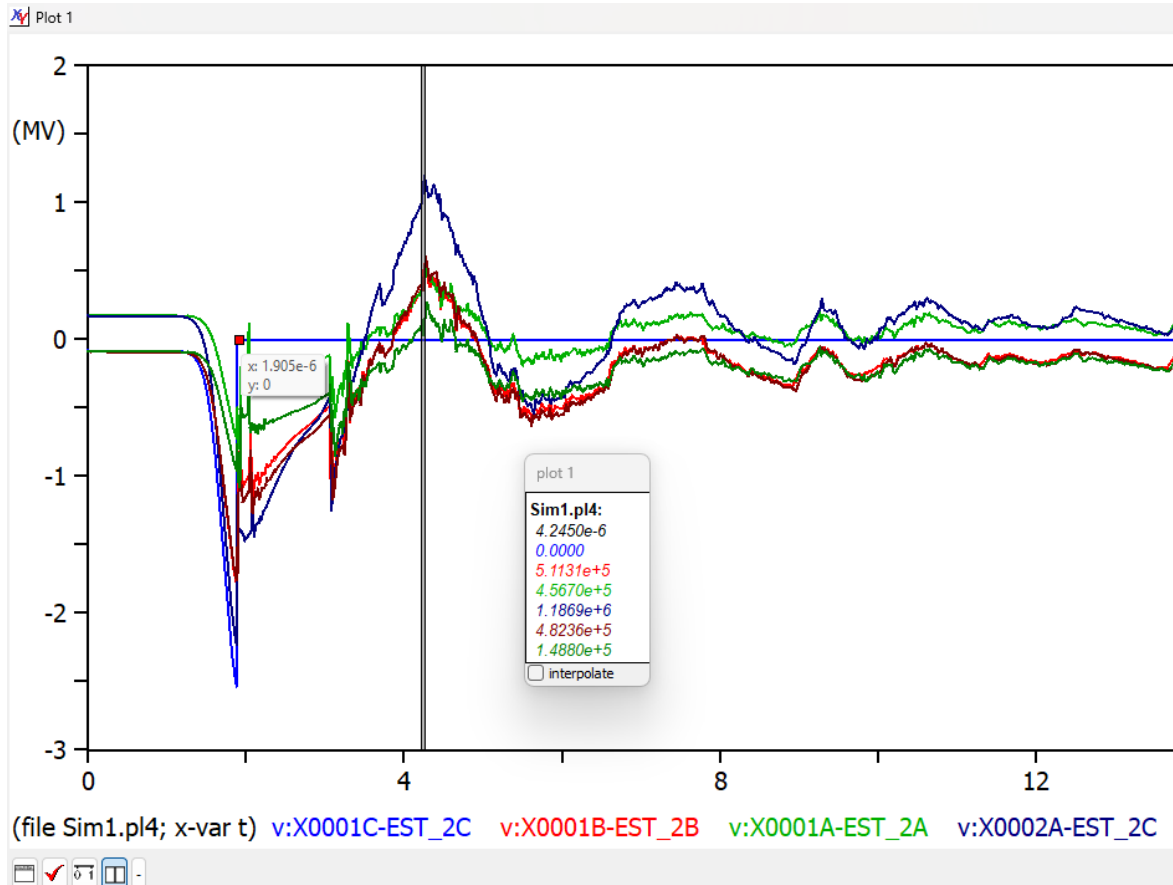


Fig 28. Backflashover generado en la fase C de la primera terna trifásica por el rayo de 70 kA en el SPAT de 2 contrapesos de 50m

4.2. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 2 contrapesos de 80m

En el caso de la configuración de 2 contrapesos de 80 metros, la Fig 29 muestra los valores de los parámetros R, L, C ingresados en el software ATP, juntamente con el valor de corriente de rayo usado, luego de aplicar las fórmulas detalladas en el capítulo III los valores ingresados se encuentran calculados en la TABLA VIII Con estos valores se procedió a simular la descarga atmosférica en el software.



NAME	EXPRESSION
R2	369.80
L2	8.01E-3
C2	1.91E-4
IRAYO	70.*1000.
TIME	0.154*((IRAYO/1000.)*0.624)

Fig 29. Variables R , L , C de 2 contrapesos de 80m y valor de corriente de rayo en ATP

Al simular la descarga atmosférica, se determinó que el sistema de puesta a tierra de esta configuración no cumple con la función de disipar la corriente de falla hacia el suelo, generando un *backflashover* (contorneo inverso), el software ATP representa el *backflashover* como un valor de 0 voltios en la fase afectada, este incumplimiento se determinó al analizar que después de la descarga atmosférica se generó un sobrevoltaje que superó la capacidad de aislamiento del aislador ISF, por el código de programación del aislador el interruptor se cerró, haciendo que el aislador actúe como un conductor permitiendo el paso de corriente por la cadena de aisladores hacia la fase C de la primera terna trifásica de esta torre, haciendo que no exista diferencia de potencial entre estos dos elementos, lo que resulta en un valor de 0 voltios en dicha fase. La Fig 30, muestra como la fase afectada (v: X001C-EST_2C) de color azul claro presenta un valor de 0 voltios posterior a los 1,873 μ s indicando que no hay diferencia de potencial, por la falla de aislamiento, motivo por el cual, luego de producida esta falla de alta frecuencia la línea de transmisión se desconectará por acción de las protecciones instaladas. Para un mejor entendimiento en las curvas de sobrevoltaje se observa un punto rojo, el cual indica una posición; el **eje x** representa el tiempo en μ s y el **eje y** representa el valor de voltaje en MV. En esta simulación el mayor sobrevoltaje se presentó en la fase C de la segunda terna trifásica con un valor de 1,26 MV a los 4,24 μ s.

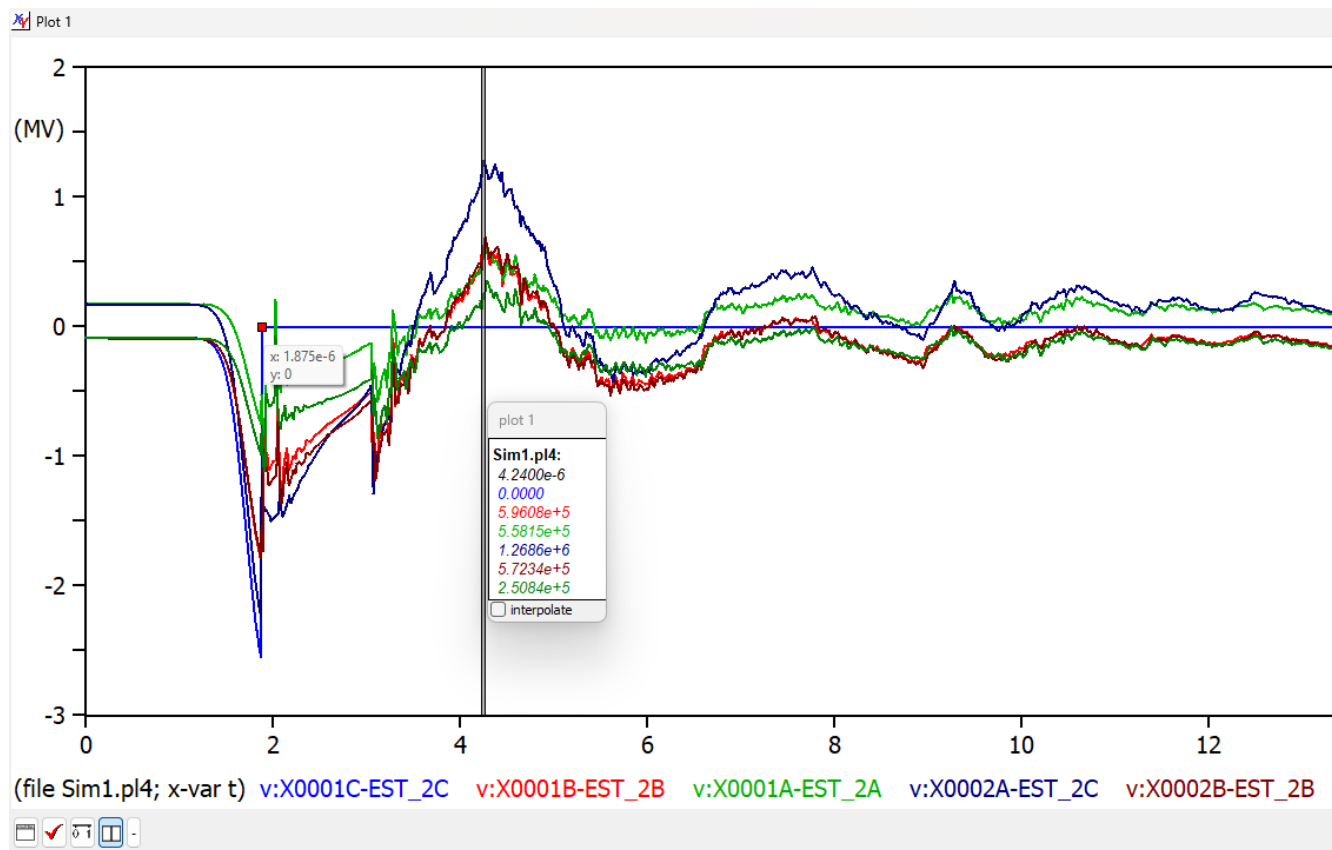


Fig 30. Backflashover generado en la fase C de la primera terna trifásica por el rayo de 70 kA en el SPAT de 2 contrapesos de 80m

4.3. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 4 contrapesos de 50m

En la Fig 31; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra el registro de los valores de los parámetros R, L y C mutuos en el software ATP correspondientes a 4 contrapesos una longitud de 50m, junto con el valor de la corriente de rayo utilizada en el proceso. Los valores ingresados se encuentran calculados en la TABLA X.

NAME	EXPRESSION
R2	473.3
L2	1.376E-3
C2	2.617E-4
IRAYO	70.*1000.
TIME	0.154*((IRAYO/1000.)*0.624)/1000.

Fig 31. Variables R, L, C con 4 contrapesos de 50m y valor de corriente de rayo en ATP



Al simular la descarga atmosférica de 70 kA, se obtuvo que el sistema de puesta a tierra de 4 contrapesos de 50m cumple correctamente su propósito de derivar la corriente de falla hacia el suelo, es decir no se produce *backflashover* (contorneo inverso) en ninguna fase, ya que el valor de sobrevoltaje producido por la falla de alta frecuencia no superó el valor de voltaje disruptivo de los aisladores instalados. En este caso el valor de resistencia del SPAT permite que toda la corriente del rayo se disipe por los contrapesos instalados. Para mejor entendimiento, Fig 32 se muestra un punto rojo que indica una posición; el **eje x** representa el tiempo en μs y el **eje y** representa el voltaje en MV, entonces, se observa que la fase C de la segunda terna trifásica de la torre, en color azul oscuro azul (v: X002A-EST_2C) posee la mayor magnitud de sobrevoltaje con un valor de 0.912 MV aproximadamente a los 4.15 μs posteriores al impacto del rayo.

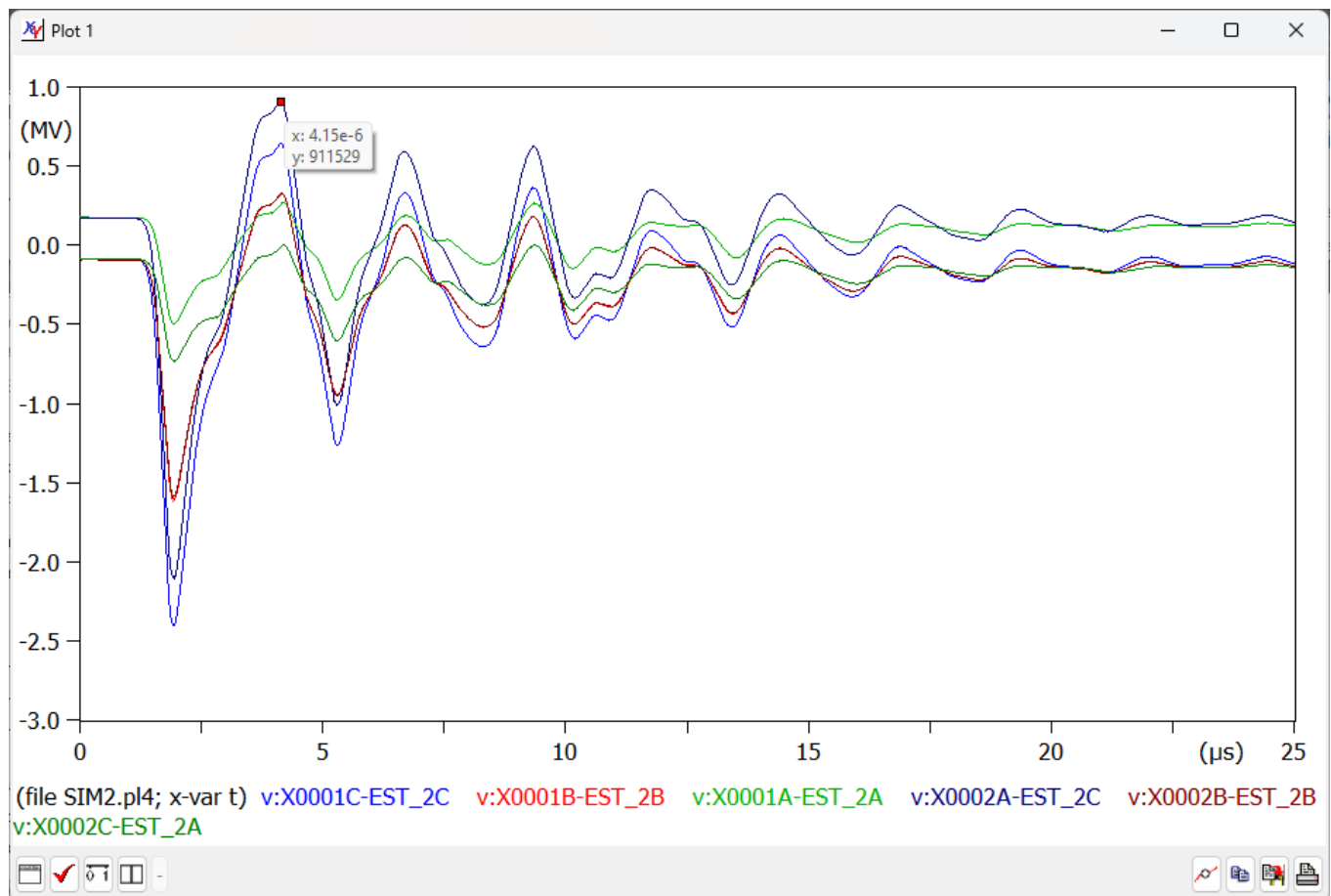


Fig 32. Sobrevoltajes generados por el rayo de 70 kA en el SPAT de 4 contrapesos de 50m



4.4. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 4 contrapesos de 80m

En la Fig 33, se muestra el registro de los valores de los parámetros R, L y C mutuos en el software ATP correspondientes a 4 contrapesos con una longitud de 80m, junto con el valor de la corriente de rayo utilizada en el proceso. Los valores ingresados se encuentran calculados en la TABLA XI.

NAME	EXPRESSION
R2	342.9
L2	2.626E-3
C2	3.6129E-4
IRAYO	70.*1000.
TIME	0.154*((IRAYO/1000.)*0.624)/100

Fig 33. Variables R, L, C con 4 contrapesos de 80m y valor de corriente de rayo en ATP

La simulación realizada, arrojó como resultado que el sistema de puesta a tierra de 4 contrapesos de 80m no cumple el objetivo de disipar la corriente de falla a tierra para evitar interrupciones del servicio, dado que se produce un sobrevoltaje que ha superado el voltaje disruptivo del aislador ISF lo que ha generado un *backflashover* (contorneo inverso) desde el brazo de la torre hacia la fase C de la primera terna trifásica, es decir que, en esta simulación el sobrevoltaje producido posterior a la falla de alta frecuencia ha superado la capacidad de aislamiento del bloque ISF, haciendo que el aislador se comporte como un interruptor cerrado por su código de programación, de este modo permitió que la corriente del rayo circule a través del aislador hacia la fase afectada, provocando que no exista diferencia de potencial entre estos dos elementos, lo que se traduce, que en esta fase el valor de voltaje es de 0 voltios, que es como ATP representa un *backflashover*. Como resultado, la fase afectada (v: X001C-EST_2C) muestra un valor de 0 voltios, indicando que no hay voltaje después de aproximadamente 3,355 μ s del impacto del rayo en el cable de guarda, en la Fig 34, se puede observar un punto rojo que indica una posición, el *eje x* representa el tiempo en μ s y el *eje y* representa el voltaje en MV. Luego de producida esta falla de alta frecuencia, la línea de transmisión se desconectará por acción de las protecciones instaladas. También se aprecia que la mayor magnitud de sobrevoltaje se da en la misma fase con una magnitud de 2,207 MM a los 3,325 μ s.

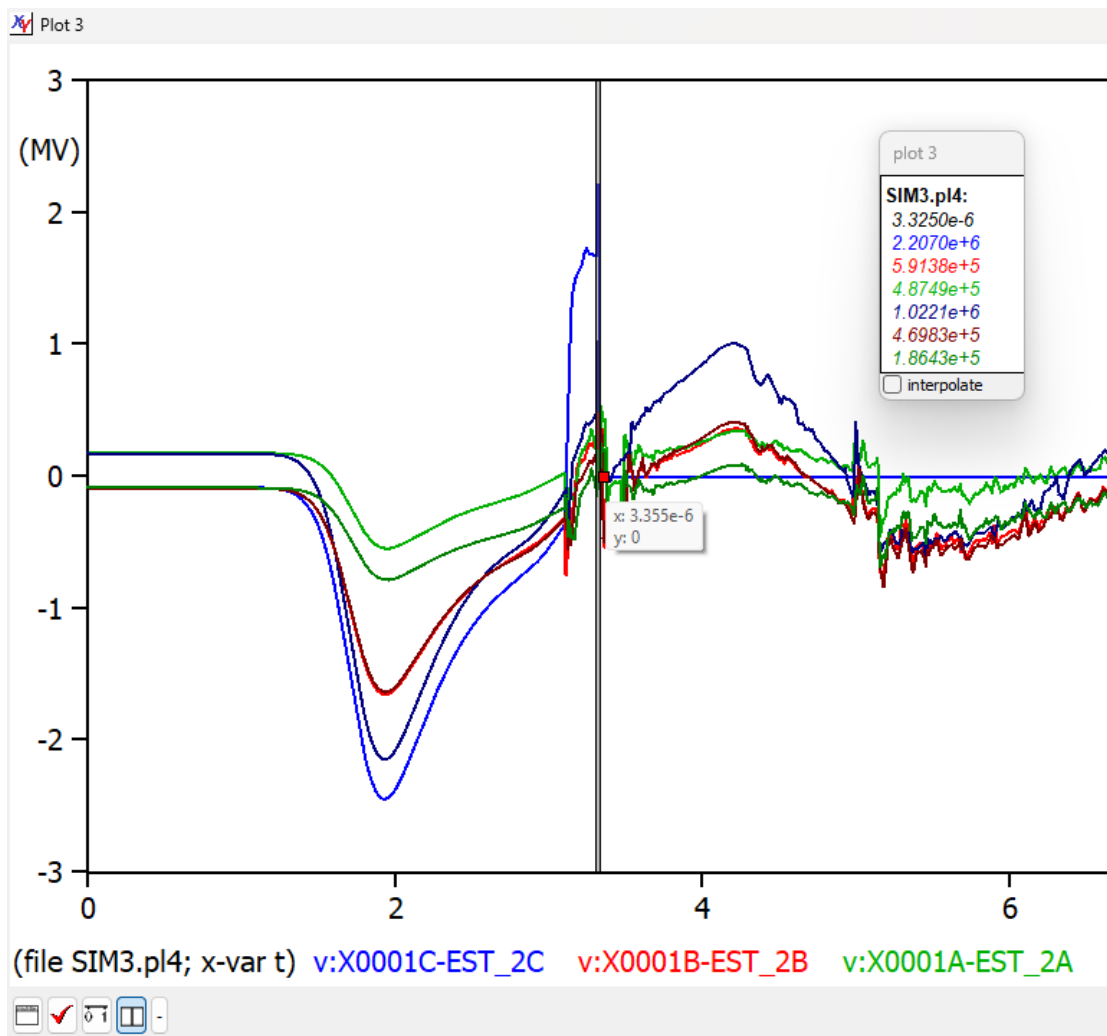


Fig 34. Backflashover generado en la fase C de la primera terna trifásica por el rayo de 70 kA en el SPAT de 4 contrapesos de 80m

4.5. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 6 contrapesos de 50m

En la Fig 35, se muestra el registro de los valores de los parámetros R, L y C mutuos en el software ATP correspondientes a 6 contrapesos de longitud de 50m, junto con el valor de la corriente de rayo utilizada en el proceso. Los valores registrados han sido calculados en la TABLA XIII.



NAME	EXPRESSION
R2	463.39
L2	5.94E-4
C2	3.44E-4
IRAYO	70.*1000.
TIME	$0.154*((IRAYO/1000.)^{**0.624})/100$

Fig 35. Variables R , L , C de 6 contrapesos de 50m y valor de corriente de rayo en ATP

Luego de simular la descarga atmosférica de 70 kA, se comprobó que el sistema de puesta a tierra de 6 contrapesos de 50m cumple su función de desviar la corriente de falla hacia el suelo, es decir no se produce *backflashover* (flameo inverso) en ninguna fase, dado que el valor de sobrevoltaje producido por la descarga no superó el voltaje disruptivo de los aisladores ISF instalados. Los valores de resistencia inductancia y capacitancia calculados permiten que toda la corriente de rayo se disipe por los 6 contrapesos. En este caso, la fase C de la segunda terna trifásica de la torre, de color azul oscuro (v: X002A-EST_2C), presenta el mayor sobrevoltaje, en la Fig 36 se muestra un punto rojo, el cual indica una posición, el **eje x** representa el tiempo en μs y el **eje y** representa el voltaje en MV, entonces se puede observar que 0,830 MV es el sobrevoltaje generado a los 4.12 μs después del impacto del rayo.

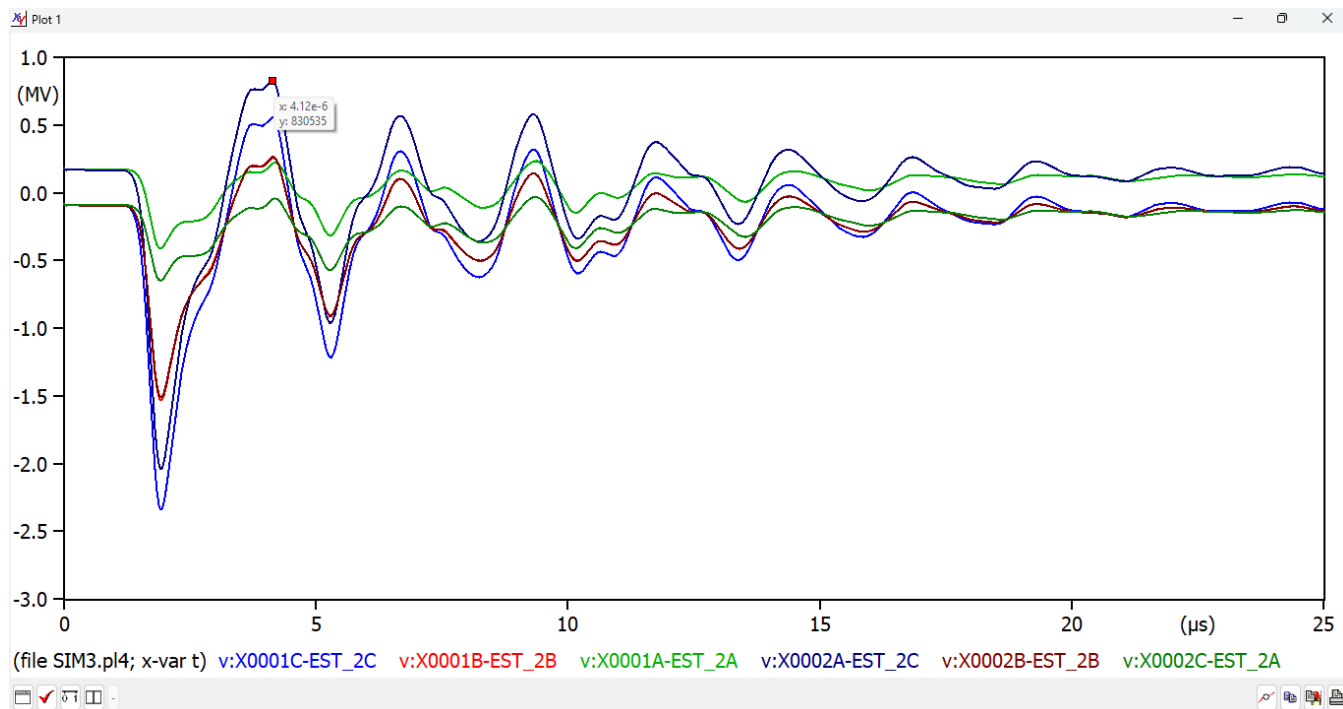


Fig 36. Sobrevoltajes generados por el rayo de 70 kA en el SPAT de 6 contrapesos de 50m

4.6. Impacto de rayo en torre con SPAT de configuración de 6 contrapesos de 80m

En la Fig 37, se muestra el registro de los valores de los parámetros R, L y C en el software ATP correspondientes a 6 contrapesos con una longitud de 80m, junto con el valor de la corriente de rayo utilizada en la simulación. Los valores ingresados se encuentran calculados en la TABLA XIV

NAME	EXPRESSION
R2	350.2
L2	1.37E-3
C2	4.55E-4
IRAYO	70.*1000.
TIME	0.154*((IRAYO/1000.)*0.624)/1000.

Fig 37. Variables R, L, C de 6 contrapesos de 80m y valor de corriente de rayo en ATP



Al simular la descarga atmosférica de 70 kA, se tiene como resultado que el sistema de puesta a tierra está cumpliendo su función adecuadamente, al derivar la corriente de falla hacia el suelo, evitando así el *backflashover* (contorneo inverso). En este caso, la fase C de la segunda terna trifásica de la torre, de color azul oscuro (v: X002A-EST_2C), presenta la mayor magnitud de sobrevoltaje, alcanzando aproximadamente 1,000 MV a los 4.11 μ s después del impacto del rayo. Lo antes mencionado se puede observar en la Fig 38

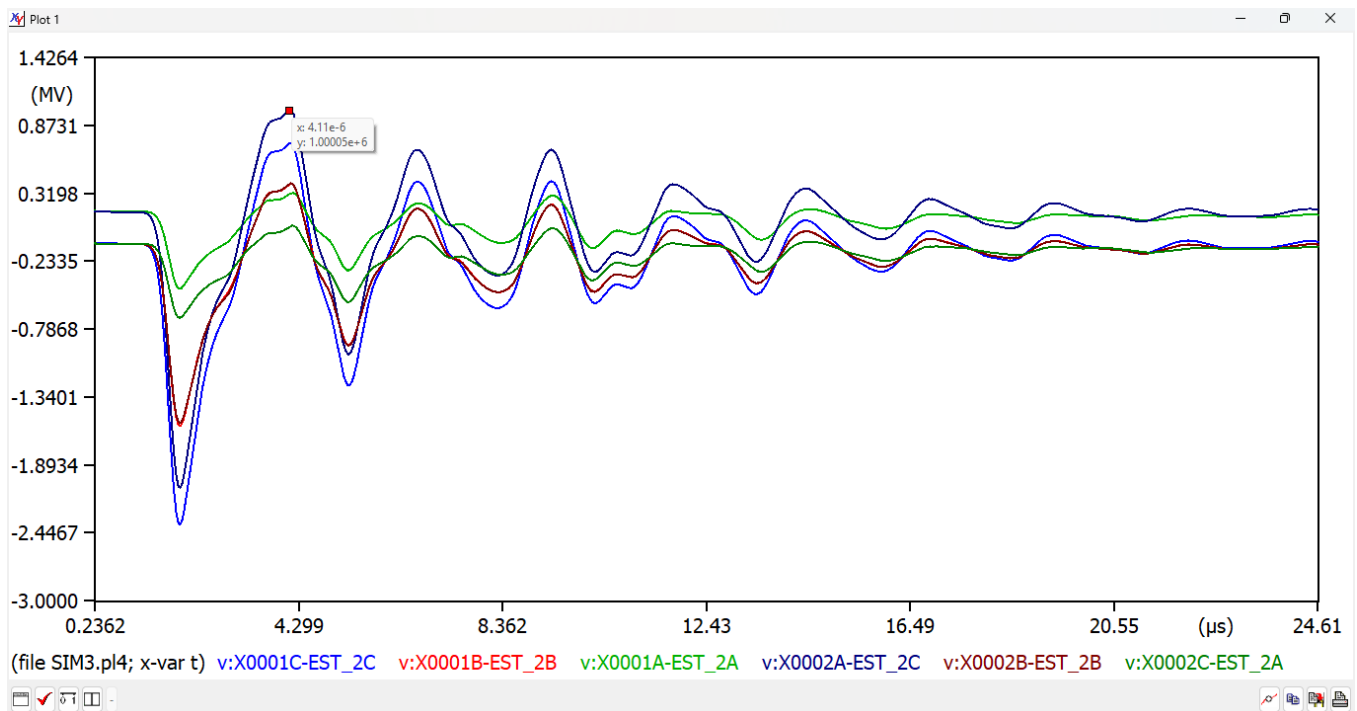


Fig 38. Sobrevoltajes generados por el rayo de 70 kA en el SPAT de 6 contrapesos de 80m

4.7. Análisis de resultados

Como se pudo evidenciar en las Fig 28 Fig 30, Fig 32, Fig 34, Fig 36 y Fig 38, para cada configuración y longitud de contrapesos los valores de sobrevoltaje y tiempo de respuesta del SPAT son distintas, se concluyó que un contrapeso de menor longitud (50m) toleró un mayor tiempo los sobrevoltajes de la falla de alta frecuencia. Se producen distintos valores tiempo y valores de sobrevoltaje debido a, que al aplicar las fórmulas de Sunde los resultados de resistencia, inductancia y capacitancia son diferentes, ya que las configuraciones 2, 4 y 6 contrapesos tienen



distintas fórmulas, en las cuales la longitud del contrapeso afecta de manera directa al resultado de resistencia e inductancia, dado que es un dato presente en sus ecuaciones, por tal motivo, variar la longitud del contrapeso en una misma configuración hará que los parámetros antes mencionados sean mayores o menores según el valor de longitud empleado. La TABLA XV. muestra que para una mayor longitud de contrapeso el valor de inductancia (L) aumenta, lo que a su vez aumenta la reactancia inductiva por su ecuación, $XL = 2\pi fL$, afectando a la correcta disipación de la corriente a tierra.

TABLA XV.

Valores de inductancia y reactancia inductiva de las distintas configuraciones de SPAT

Configuración SPAT	L [m]	L [mH]	XL
2 contrapesos	50	4,75E-03	2981,37143
	80	8,01E-03	5032,83143
4 contrapesos	50	1,38E-03	864,566298
	80	2,62E-03	1645,56623
6 contrapesos	50	5,94E-04	373,409703
	80	1,37E-03	859,53975

En el caso de la capacitancia, su valor aumenta cuando se presenta un mayor número de contrapesos, por lo que, se concluyó que es óptimo usar más contrapesos ya que permite un mayor valor de capacitancia y esto hace que el efecto inductivo del SPAT se reduzca ya que la capacitancia e inductancia son parámetros opuestos y se contrarrestan, la capacitancia (C), es inversamente proporcional a la reactancia capacitiva $XC = \frac{1}{2\pi fC}$, resultando en un valor de XC menor, actuando como un camino de baja impedancia al paso de la corriente, esto se evidencia en la TABLA XVI.



TABLA XVI.

Valores de capacitancia y reactancia capacitiva de las distintas configuraciones de SPAT

Configuración SPAT	L [m]	C [uF]	XC
2 contrapesos	50	1,29E-04	1,23E-02
	80	1,91E-04	8,33E-03
4 contrapesos	50	2,62E-04	6,08E-03
	80	3,61E-04	4,41E-03
6 contrapesos	50	3,44E-04	4,63E-03
	80	4,55E-04	3,50E-03

Una vez analizadas las ecuaciones de X_L y X_C se concluyó que un menor valor de longitud de contrapeso y un mayor número de contrapesos genera una capacitancia alta que contrarresta el efecto inductivo, lo que resulta en un menor valor de la impedancia del sistema de puesta a tierra, por su ecuación; $Z = R + j(X_L - X_C)$, disminuye y permite una correcta disipación de la corriente de falla a tierra cuando se emplea una longitud de 50m en los contrapesos usados en este trabajo.

Finalmente, los resultados de las simulaciones de las configuraciones de 2, 4 y 6 contrapesos con 50m y 80m se muestran de manera organizada en la TABLA XVII.

TABLA XVII.

Resultados de las simulaciones en las distintas configuraciones de contrapesos empleadas

Configuración SPAT	L [m]	R [Ω]	L [mH]	C [μF]	Backflashover		Mayor Sobrevoltaje	
					Tiempo [μs]	Voltaje [MV]	Tiempo [μs]	Voltaje [MV]
2 contrapesos	50	548,603	4,745E-03	1,29E-04	1,9	0	4,25	1,19
	80	369,806	8,010E-03	1,91E-04	1,87	0	4,24	1,26
4 contrapesos	50	473,295	1,376E-03	2,617E-04	No se produce		4.15	0.912
	80	342,935	2,619E-03	3,612E-04	3,355	0	3.32	2,207



6 contrapesos	50	463,391	5,943E-04	3,437E-04	No se produce	4.12	0,830
	80	350,210	1,368-03	4,548E-04	No se produce	4.11	1,000

Donde se confirma que la longitud óptima para un SPAT es la de 50 m, después de observar y analizar que en la configuración de 4 y 6 contrapesos con esta longitud no presenta un backflasover y el tiempo en el cual se produce el mayor sobrevoltaje es mayor que el tiempo en el que se produce este mismo fenómeno, pero con contrapesos de 80m en dichas configuraciones.

Otro resultado que respalda esta hipótesis es, que en el caso de configuraciones de 2 y 4 contrapesos de 50m el tiempo en el cual se produce el *backflashover* es mayor al tiempo en el que se produce este mismo fenómeno con 80m de longitud, es decir, los SPAT que poseen contrapesos de 50m, disipan la corriente de falla mayor tiempo antes de producirse un *backflashover*. Por tal motivo, en la simulación de este tramo de línea de transmisión usando valores de 50m y 80m en los contrapesos, se concluyó que las configuraciones de SPAT con mayor número de contrapesos con menor longitud (50m), cumplen de mejor manera la disipación de las corrientes de falla a tierra para evitar la salida de las líneas.



CONCLUSIONES

- Luego de una investigación del funcionamiento de los sistemas de puesta a tierra (SPAT) en líneas de transmisión ante fallas de alta frecuencia, se concluye que, en estos fenómenos, no es posible despreciar los efectos inductivos y capacitivos que se presentan en el SPAT tras una descarga atmosférica. A diferencia de las frecuencias industriales, en alta frecuencia los parámetros inductivos alcanzan valores elevados, lo que incrementa la reactancia inductiva y dificulta la disipación de las corrientes de falla hacia tierra. Como consecuencia se generan sobrevoltajes elevados, los cuales pueden provocar *backflashovers* de la torre hacia la fase, resultando en la desconexión de la línea y la interrupción del suministro eléctrico.
- Después del análisis de las características de un sistema de puesta a tierra en alta frecuencia, basándose en criterios estandarizados en la bibliografía usada en este trabajo, se demostró que la longitud de 50m en los contrapesos, de las configuraciones de 4 y 6 contrapesos, obtuvieron valores de inductancia y capacitancia que lograron derivar corrientes de falla a tierra evitando que se genere *backflashover* en estos casos. En contraste, la configuración de 2 contrapesos de 50m si generó *backflashover* debido que el valor de capacitancia es muy bajo porque que no posee un número elevado de contrapesos, no contrarrestó a la alta inductancia generada. Por lo tanto, se concluyó que los contrapesos de menor longitud (50m) son más efectivos ya que su menor inductancia reduce la reactancia inductiva del SPAT en comparación a la producida de contrapesos de 80m.
- Mediante la realización de múltiples simulaciones en el software ATP, utilizando configuraciones de 2, 4 y 6 contrapesos, con longitudes de 50m y 80m, se determinó que el uso de contrapesos de menor longitud cumplen de mejor manera, el objetivo de reducir la impedancia de sistema de puesta a tierra, ya que el valor de inductancia del SPAT se reduce cuando la longitud de contrapeso es menor, Además el uso de un mayor número de contrapesos resulta en un mayor valor de capacitancia y reduce significativamente la resistencia del SPAT al existir mayor superficie de contacto de los contrapesos con el suelo, lo que favorece a la disipación de corrientes de falla.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios sobre el uso de pararrayos en sistemas de transmisión, ya que estos dispositivos previenen los *backflashovers* al conducir la corriente de descarga atmosférica a tierra, evitando que el aislador conduzca corriente en caso de superar el nivel de aislamiento. Estos estudios permitirían validar cómo su instalación contribuye al desempeño del sistema de puesta a tierra en torres de transmisión, considerando costos de inversión
- Se recomienda el análisis de uso de mejorador de suelo, así como electrodos activos o pasivos, posterior a medición de la resistividad del suelo en zonas donde este valor sea elevado, para reducir la resistencia del SPAT, evitando su sobredimensionamiento, considerando costos de inversión.
- Considerar el análisis mediante estudios y simulaciones del impacto del uso de capacitores en los contrapesos de sistemas de puesta a tierra, con el objetivo de mitigar el efecto inductivo que se pueda generar posterior a fallas de alta frecuencia.



Referencias Bibliográficas

- [1] R. I. C. Rodríguez, Evaluación y mejora del proceso de diseño eléctrico del sistema de puesta a tierra de las estructuras de soporte de las líneas de transmisión intervenidas por CODENSA, Bogotá: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2018.
- [2] R. Poma, "Influencia de un sistema de aterramiento por contrapesos horizontales en la optimización de la resistencia de puesta a tierra de las torres de transmisión de la línea de 33 kV pertenecientes a Electroperu S. A.", Huancayo, Perú: Universidad Continental, 2020.
- [3] E. L. Ricaldi Yarvi, R. Torrez Santalla, C. Quispe y J. Quispe Mamani, CHARACTERISTIC ELECTRICAL ATMOSPHERIC DISCHARGES IN THE BOLIVIAN SKY, La Paz, 2018.
- [4] «"Plan Maestro de Electricidad – Ministerio de Energía y Minas."», 2020. [En línea]. Available: [Online]. Available: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>.
- [5] J. M. Castillo Hernández , "MODELADO Y ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE ÁNGULOS DE BLINDAJE DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 400 KV.", Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Mexico., 2019.
- [6] A. J. Sánchez Rojas, "Mejoramiento de las resistencias de puesta a tierra de la línea de transmisión 13,8 KV de la Central Hidroeléctrica Cerro del Águila para garantizar la continuidad de servicio.", Huancayo, Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, 2021.
- [7] E. A. Usnayo Lazo y E. Mamani Luna, "Diseño de un sistema de puesta a tierra para la línea de transmisión de 60 KV desde la SE María Jiray hasta la unidad minera Contonga.", Arequipa: Universidad Continental, 2020.
- [8] E. M. Simbaña Pulupa, "Estimación de parámetros de suelo no homogéneo y diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Loreto 138/69 kV.", Quito Ecuador : EPN, 2018.
- [9] J. F. Caiza Moreno y C. F. Torres Gonzaga, "Desarrollo de una herramienta informática para el diseño de sistemas de puestas a tierra en subestaciones y líneas de transmisión.", Latacunga, Ecuador : UTC, 2020.
- [10] J. V. Revelo Soto, "Análisis del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra ante altas frecuencias, aplicación a descargas atmosféricas.", Quito, Ecuador : EPN, 2020.
- [11] D. J. Valencia Potosí, PROPUESTA DE UN MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN PUNTOS ESPECÍFICOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE EMELNORTE., Ibarra Ecuador: Universidad Técnica del Norte, 2019.



- [12] C. G. Coronel Naranjo y F. M. Sinchi Sinchi, "Diseño y evaluación de configuraciones de puesta a tierra en diferentes tipos de suelo empleando materiales de baja resistividad", Cuenca Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [13] F. J. Rojas Caicedo, "Diseño de los sistemas de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas para el complejo agroecológico de investigación y desarrollo productivo San José de Ayora, cantón Cayambe", Quito Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [14] L. A. Echeverría Santillán y L. M. Guagua Macías , "Análisis y rediseño del sistema de puesta a tierra para la Sub-estación Palestina mediante Matlab", Guayaquil Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [15] P. V. Fernández Chica y O. E. Loayza Romero , Manual de mantenimiento de puestas a tierra de la línea de subtransmisión 69kV Sacha - Orellana", Cuenca Ecuador : Universidad de Cuenca, 2018.
- [16] «"IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," in IEEE Std 80-2000 , vol., no., pp.1-192, 4 Aug. 2000, doi: 10.1109/IEEESTD.2000.91902.,» [En línea].
- [17] D. R. Peñafiel Toledo, "Optimización multiobjetivo en sistemas de puesta a tierra para subestaciones de potencia considerando la longitud de conductor.", Quito Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana , 2019.
- [18] A. R. Chicaiza Rodríguez y M. G. Guanaluiza De Faz, "Diseño de las instalaciones eléctricas e implementación de la puesta a tierra de protección de la 'Unidad Educativa Mariano Negrete'. Para reducir las fallas del sistema.", Latacunga Ecuador : Universidad Técnica de Cotopaxi, 2020.
- [19] V. G. Basante Gualpa, "Análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos y condiciones de suelos.", Quito Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [20] W. R. Bravo Villacres y E. R. Reinoso Chicaiza, "Construcción de un electrodo activo y análisis técnico-económico.", Latacunga Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi, 2019.
- [21] P. A. Ambrosi Bustamante, "Análisis y diagnóstico del sistema de puesta a tierra de la S/E 03 Monay.", Cuenca Ecuador : Universidad de Cuenca, 2019.
- [22] J. R. Moya Piedra y W. B. Pilatasig Quispe, "Dimensionamiento de la malla de puesta a tierra para los laboratorios de alto voltaje de la universidad técnica de Cotopaxi.", Latacunga Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi, 2019.
- [23] IEEE80, Guía para la Seguridad de puesta a tierra en Subestaciones de C.A., New York: IEEE, 2013.
- [24] J. G. Chiliquinga Taipe y L. E. Guanaluiza, "Evaluación del sistema de puesta a tierra de la línea de subtransmisión Ambato - Samanga y Samanga - Píllaro a 69 kV perteneciente a la empresa eléctrica Ambato para proponer alternativas que permitan mejorar el sistema.", Latacunga Ecuador : Universidad Técnica de Cotopaxi, 2017.



- [25] M. F. T. d. I. Vega, Valor óptimo de la inversión para mitigar o mejorar las fallas en líneas de transmisión., Universidad de los Andes, 2020.
- [26] B. Escobar y L. Ruales, «"Coordinación de aislamiento en forma determinística, ante descargas atmosféricas en subestaciones aisladas en SF6. Aplicación: patio de 230 kV de la subestación Sopladora."», 2016. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17190/1/2016AJIEE-17.pdf>.
- [27] B. A. Peña Goyes, "Optimización del sistema de puesta a tierra a través del análisis y diagnóstico del sistema de mallado actual, para su modificación y mejoramiento en la planta de tratamiento de agua Conocoto, en la ciudad de Quito.", Latacunga Ecuador : ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas, 2019.
- [28] L. O. Pilca Pilca y J. M. Yuquilema Aldaz, "Guía para el desarrollo de modelos de simulación en ATP para estudios de coordinación de aislamiento en sistemas tipo II.", Quito Ecuador : EPN, 2022.
- [29] W. H. Chero Nizama y J. E. Yacupaico Caruajulca, "Estudio de coordinación de aislamiento para implementar sistema de protección contra sobretensiones atmosféricas en líneas de transmisión I-6689/60 kv Sihuas – Pomabamba, Ancash.", Trujillo Perú: Universidad César Vallejo, 2020.
- [30] L. M. Abril Chafra y F. G. Azogue Aguaiza, "Diseño y modelado del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para la estación Cotopaxi del Instituto Geográfico Militar.", Latacunga Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi , 2021.
- [31] «ATPDraw 7.3 Manual for Windows: Features, Circuit Modeling, and | Course Hero», [En línea].
- [32] I. 62305-1, «"Protection against lightning Part 1: General principles."», 2010. [En línea]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6793>. [Último acceso: 08 Mayo 2024].
- [33] R. D. Gualotuña, J. D. Ramírez , M. A. Lucio, N. V. Granda y F. L. Quilumba , «"Estimación de los Parámetros Eléctricos de una Línea de Transmisión Trifásica a Escala de Laboratorio a Partir de Mediciones de Transitorios de Voltaje."», Revista Técnica "energía". No. 16, Issue II, Pp. 9-18, Enero 2020. [En línea]. Available: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rte/v16n2/2602-8492-rte-16-02-00009.pdf>.
- [34] J. H. Calle y W. Guamán Cuenca, «"Análisis Estadístico de Sobretensiones Por Maniobra en Líneas de Transmisión de Extra Alta Tensión."», Revista Técnica "energía". No. 19, Issue II, Pp. 10-2, 01 Enero 2023.
- [35] F. I. Lozada Jordán , "Detección de fallas en líneas de transmisión utilizando la transformada de Wavelet.", Quito Ecuador : EPN, 2017.
- [36] G. P. V. Peláez, Detección de fallas en los aisladores de la línea de transmisión eléctrica Bloque MDC-PBHI aplicando visión artificial., Quito: Escuela Politécnica Nacional , 2019.



[37] P. I. T. 60071-4:2004, 2004.

[38] E. D. Sunde , "Earth conduction effects in transmission systems.",, New York: : Dover Publications, 1968..

[39] J. O. Saldanha Paulino, W. Couto Boaventura , A. Barros Lima y M. Ferreira Guimarães, «"Transient voltage response of ground electrodes in the time-domain."», de *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria, 2012.

[40] J. A. M.-D. y. E. A. S.-R. J. A. Mariño-Rojas, «Influencia de los sistemas de puesta a tierra descritos en el estándar IEEE 1243 en la tasa de fallas por rayos de líneas de transmisión», Rev. UIS ing., vol. 20, n.º 1, pp. 223–238, , 2020.



ANEXOS

Anexo A

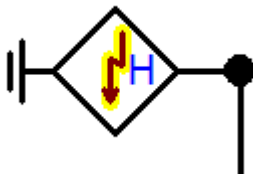


Fig 39. Representación gráfica de la Fuente Heidler (rayo) en ATP.

Anexo B

TABLA XVIII.

Datos de conductores usado en la simulación

Rin, conductor [cm]	0
Rout, conductor [cm]	1,4111
Resistencia DC [ohm/km]	0,067
Rho [ohm * m]	4,19E-08

Anexo C

TABLA XIX.

Datos de los cables de guarda empleados en la simulación

CABLE DE ACERO TIPO EHS 3/8	
Rin, conductor [cm]	0
Rout, conductor [cm]	0,477
Resistencia DC [ohm/km]	2,36
Rho [ohm * m]	1,69E-07
OPGW / 12 FIBRAS	
Rin, conductor [cm]	0,28
Rout, conductor [cm]	0,56
Resistencia DC [ohm/km]	0,485
Rho [ohm*m]	3,58E-08

Anexo D

TABLA XX.

Geometría de las torres de transmisión

Altura de conductores [m]	15
Altura de conductores de guarda [m]	32
Separación entre fases [m]	7
Separación entre ternas [m]	9,8



Separación entre cable de guarda [m] 11

Anexo E

TABLA XXI.

Datos de la línea LCC simulada

#	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ. [cm]	Alp ha	N B
1	0	1,4111	0,067	-4,9	31,2	19,2	0	0	1
2	0	1,4111	0,067	-4,9	24,2	12,2	0	0	1
3	0	1,4111	0,067	-4,9	17,2	5,2	0	0	1
4	0	1,4111	0,067	4,9	17,2	5,2	0	0	1
5	0	1,4111	0,067	4,9	24,2	12,2	0	0	1
6	0	1,4111	0,067	4,9	31,2	19,2	0	0	1
7	0	0,477	2,36	-5,5	38	26	0	0	1
8	0,28	0,56	0,485	5,5	38	26	0	0	1

Anexo F

TABLA XXII.

Distancia de los vanos ingresada manualmente en ATP

Vano	Longitud [km]
Vano 1	5,8
Vano 2	0,18
Vano 3	0,27
Vano 4	0,175
Vano 5	0,175
Vano 6	0,175
Vano 7	0,75
Vano 8	10

**Anexo G**

TABLA XXIII.

Valores Z, R, L, de las torres simuladas en ATP

Impedancia	[Ω]	Resistencia	[Ω]	Inductancia	[mH]
Z1	220	R1	8,66	L1	0,00184
Z2	220	R2	20,21	L2	0,00431
Z3	220	R3	20,21	L3	0,00431
Z4	150	R4	33,48	L4	0,00714

Anexo H Código de programación del Bloque ISF (Aislador), empleado en el estudio.**MODEL ISF***comment*-----

```

|Several line insulation flashover models |
|
| Input: Voltage across the insulator      |
| Output: Close command for the TACS switch |
|
| Please note the use of the following user |
| accessible variables:                     |
| D: Insulator string length/gap length   |
| K1: Constant for the Shindo & Suzuki LDM |
| K2: Constant for the Shindo & Suzuki LDM |
| K3: Constant for the CIGRE LDM          |
| E0: Critical electric field strength for  |
| the CIGRE, Pigini et al. and modified   |
| Motoyama LDM                            |
|
| Integration method:                      |

```



| *DE: Critical Disruptive Effect* |
 | *U0: Minimum required voltage* |
 | *K: Constant* |
 | |
 | *MS: Model selection variable (integer)* |
 | |

-----endcomment

INPUT UP, UT

OUTPUT CLOSE --output of the model. The model must be connected to a TACS switch.

DATA D {DFLT:1.86}, K1 {DFLT:5E-8}, K2 {DFLT:0.005}, K3 {DFLT:1.3}

DATA E0 {DFLT:600}, DE {DFLT:525.4}, U0 {DFLT: 638.7}, K {DFLT: 1}, MS {DFLT:1}

VAR CLOSE, U, TT, FLASH, TIME, C1, C2, DEC, AUX

VAR DECR, FLAG, L, V, VP, K11, VDQ, EN

FUNCTION ODE(U1, K1, K2, D, L, VP):=

$K1*U1*U1/(D-2*L)+K2*U1*5*10^{**}(-10)*U1*VP*L/((D-2*L)*D)$ --Shindo & Suzuki LDM

FUNCTION ODEC(U1, K3, D, E0, L):=K3*U1*(U1/(D-L))-K3*U1*E0 --CIGRE LDM

FUNCTION ODEP(U1, D, E0, L):=170*D*((U1/(D-L))-E0)*exp(0.0015*(U1/D)) --Pigini et al. LDM

FUNCTION ODEM(U1, K11, D, E0, L):=K11*U1/(D-2*L)-K11*E0 --Modified Motoyama LDM

INIT



CLOSE:=open

--TACS switch initially open

TT:=0

C1:=400*D

--for the volt-time curve

C2:=710*D

--for the volt-time curve

integral(AUX):=0

DEC:=0

DECR:=DE*(1000**K)*10**(-6)

*--Critical DE in V**K*s*

AUX:=0

FLAG:=0

--Flag set to zero

L:=0

--Leader length initially zero

V:=0

--Leader velocity initially zero

VP:=0

ENDINIT**EXEC**

U:= ABS(UP-UT)

*--(V) Voltage across insulator string/gap***IF (MS<>1 AND MS<>2 AND MS<>3 AND MS<>4 AND MS<>5****AND MS<>6) THEN****ERROR**

write('***Error. Model Selection (MS) out of range.***');

STOP**ENDIF**

**IF (MS=1) THEN***--Volt-time curve***IF (t<>0 AND CLOSE=0) THEN**

TT:=TT+timestep

--Current time is seconds

TIME:=TT*10**6

--Current time in microseconds

FLASH:=(C1+(C2/(TIME**0.75)))*1000

*--Flashover voltage in V***IF (U>=FLASH) THEN**

CLOSE:=1

*--Flashover***ENDIF****ENDIF****ELSIF (MS=2) THEN***--Integration method***IF (and(FLAG=0,CLOSE=open)) THEN***--If flag=0 then the discharge has stopped because*

AUX:=0

*--U is now below U0***ENDIF**

FLAG:=0

IF (CLOSE=open) THEN*--If the TACS switch is open,***IF (U>(U0*1000)) THEN***--if U>U0*

FLAG:=1

AUX:=(U-U0*1000)**K

*--(V**K)*

DEC:=integral(AUX)

*--(V**K*s) Calculation of the current DE***IF (DEC>=DECR) THEN**

CLOSE:=closed



ENDIF

ENDIF

ENDIF

ELSIF (MS=3) THEN *--Shindo & Suzuki LDM*

IF (2*L>=D) THEN

CLOSE:=closed

ENDIF

IF (and(FLAGS=0,CLOSE=open)) THEN *--If flag=0 then the discharge has stopped because*

L:=0 *--the E is now below E0*

V:=0

ENDIF

FLAG:=0

IF (CLOSE=open) THEN *--If the TACS switch is open,*

IF ((U/(1000*(D-2*L)))>=450) THEN *--if gradient in the unabridged part of the gap>E0*

FLAG:=1

VP:=V

V:=ODE(U, K1, K2, D, L, VP) *--Current leader speed*

L:=L+V*timestep *--Next leader length*

ENDIF



ENDIF

ELSIF (MS=4) THEN *--CIGRE LDM*

IF (L>=D) THEN

CLOSE:=closed

ENDIF

IF (and(FLAGS=0,CLOSE=open)) THEN *--If flag=0 then the discharge has stopped because*

L:=0 *--the E is now below E0*

ENDIF

FLAG:=0

IF (CLOSE=open) THEN *--If the TACS switch is open,*

IF ((U/(1000*(D-L)))>=E0) THEN *--if gradient in the unbridged part of the gap>E0*

FLAG:=1

V:=ODEC(U/1000, K3, D, E0, L) *--Current leader speed*

L:=L+V*timestep *--Next leader length*

ENDIF

ENDIF

ELSIF (MS=5) THEN *--Pigini et al. LDM*



IF (L>=D) **THEN**

CLOSE:=closed

ENDIF

IF (and(FLAG=0,CLOSE=open)) **THEN** *--If flag=0 then the discharge has stopped because*

L:=0 *--the E is now below E0*

ENDIF

FLAG:=0

IF (CLOSE=open) **THEN** *--If the TACS switch is open,*

IF ((U/(1000*(D-L)))>=E0) **THEN** *--if gradient in the unbridged part of the gap>E0*

FLAG:=1

V:=ODEP(U/1000, D, E0, L) *--Current leader speed*

L:=L+V*timestep *--Next leader length*

ENDIF

ENDIF

ELSIF (MS=6) **THEN** *--Modified Motoyama LDM*

IF (2*L>=D) **THEN**

CLOSE:=closed

ENDIF



IF (and(FLAG=0,CLOSE=open)) **THEN** *--If flag=0 then the discharge has stopped because*

 L:=0 *--the E is now below E0*

ENDIF

FLAG:=0

IF (CLOSE=open) **THEN** *--If the TACS switch is open*

IF ((U/(1000*(D-2*L)))>=E0) **THEN** *--If gradient in the unbridged part of the gap>E0*

 FLAG:=1

IF (L<=(D/4)) **THEN**

 K11:=2.5

 V:=ODEM(U, K11, D, E0*1000, L) *--Current leader speed*

 VDQ:=V *--Eventually, the speed at D/4*

 EN:=U/(D-2*L) *--(V) Eventually, the field strength at D/4*

ELSE

 K11:=0.42

 V:=ODEM(U, K11, D, EN, L)+VDQ *--Current leader speed*

ENDIF

 L:=L+V*timestep *--Next leader length*

ENDIF

ENDIF

ENDIF



ENDEXEC

ENDMODEL