UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2020-06-21

COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ELECTRO-GEOMÉTRICO Y EL MODELO DEL LÍDER PROGRESIVO PARA EL ESTUDIO DE APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN EN MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

ZUMARÁN RIVERA, SERGIO

https://hdl.handle.net/11673/52624

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Comparación entre el modelo Electro-geométrico y el modelo del Líder Progresivo para el estudio de apantallamiento de líneas aéreas de transmisión en minera Doña Inés de Collahuasi

Opta al título de Ingeniero Electricista:

Sr. Sergio Zumarán Rivera

Profesores patrocinadores:

Dr. Johny Montaña Chaparro

Dr. Roger Schurch Brandt

Valparaíso, Chile
21 de Junio - 2020

Dedicatoria

"Dedicado a mi familia y amigos"

Agradecimientos

A mi familia por ser el motor fundamental de cada día y motivar a superar cada desafío.

A mi abuelo Hugo por acompañarme siempre.

A todos mis compañeros Ignacio, Manuel, Cristian y Felipe por el trabajo en conjunto y su amistad incondicional.

A mis amigos porteños por haber sido mi familia en una Valparaíso.

A todos mis amigos basquetbolistas por todos los momentos de distensión compartidos en la cancha.

A todas las personas que forman parte del departamento de Ingeniería en electricidad.

A los profesores del departamento de electricidad, por sus enseñanzas, apoyo y oportunidades brindadas a lo largo de la carrera, especialmente a los profesores Johny Montaña y Victor Hinojosa, por los desafíos planteados, su apoyo y su paciencia.

Índice general

Agradecimientos II

Lista de figuras V

Lista de tablas VI

1 Introducción **3**
1.1 Objetivos 5

2 Antecedentes de las metodologías existentes **6**
2.1 Física de la descarga eléctrica atmosférica 6
2.2 Proceso de la descarga eléctrica atmosférica. 8
2.2.1 Encendido de la descarga. 9
2.2.2 Líder escalonado. 9
2.2.3 Proceso de Enlace. 10
2.3 Modelo Electrogeométrico 12
2.3.1 Aplicación conductor sin apantallar 13
2.3.2 Aplicación línea monofásica apantallada 15
2.3.3 Aplicación línea trifásica apantallada 17
2.3.4 Corriente de falla máxima de falla de apantallamiento 18
2.3.5 Ángulo apantallamiento perfecto 19
2.3.6 Evaluación de la tasa de salidas por falla de apantallamiento . . . 20
2.4 Modelo de estimación de fallas de apantallamiento basado en MLP . . . 23
2.4.1 Modelo del líder progresivo 23
2.4.2 Modelo del líder descendente 24
2.4.3 Criterio de inicio y propagación del líder ascendente 26
2.4.4 Criterio de unión líderes 27
2.4.5 Modelo de línea de transmisión 28
2.4.6 Estimación tasa de fallas de apantallamiento 29

3 Aplicación de los modelos seleccionados **31**
3.1 Antecedentes línea alta tensión Lagunas-Collahuasi 31
3.2 Estimación Densidad de rayos 35
3.3 Aplicación del modelo Electro-geométrico 35
3.3.1 Consideraciones generales 35
3.3.2 Descripción del modelo 36
3.3.3 Diagrama de flujo para aplicación del MEG 38
3.4 Aplicación del modelo del líder progresivo 38
3.4.1 Simulación líder descendente 38

3.4.2 Consideraciones línea de transmisión . . . 39
3.4.3 Consideraciones tasa de falla de apantallamiento . . . 39
3.4.4 Descripción del modelo . . . 40
3.4.5 Diagrama de flujo para aplicación del MLP en estimación de fallas de apantallamiento . . . 41

4 Análisis y resultados 42
4.1 Resultados aplicación del MEG . . . 42
4.1.1 Ángulo de apantallamiento . . . 43
4.1.2 Corriente crítica de flameo de aisladores . . . 44
4.1.3 Corriente máxima de apantallamiento . . . 44
4.1.4 SFR Total . . . 45
4.1.5 SFFOR . . . 45
4.1.6 Corriente de rayo v/s Ancho expuesto . . . 45
4.1.7 SFR específico v/s Corriente de rayo . . . 46
4.1.8 SFR específico v/s Ancho expuesto . . . 47
4.2 Resultados aplicación del MLP para estimar tasa de falla de apantallamiento 48
4.2.1 Simulación líder descendente . . . 48
4.2.2 Corrientes de rayo. . . . 50
4.2.3 Fase de impacto . . . 51
4.2.4 Tensión inducida. . . . 51
4.2.5 Tensión de la punta del líder descendente. . . . 52
4.2.6 SFR y SFFOR . . . 53
4.3 Comparación entre los modelos en estudios . . . 54

5 Conclusiones 56

Referencias 61

Índice de figuras

Figura2.1.1 Modelo tripolar de carga de una nube de tormenta. [6] 6
Figura2.1.2 Tipo de descarga nube-tierra [17]. 7
Figura2.3.1 Concepto de distancia de impacto [17] 13
Figura2.3.2 Conductor sin apantallar [17] 14
Figura2.3.3 Línea monofásica apantallada [17] 16
Figura2.3.4 Línea trifásica apantallada [17] 18
Figura2.3.5 Corriente máxima de apantallamiento perfecto [17] 18
Figura2.4.1 Modelo 3D Líder descendente [32]. 24
Figura2.4.2 Modelo líder descendente [10] 25
Figura2.4.3 Evaluación de criterio de unión entre líderes [31]. 27
Figura2.4.4 Modelo línea de transmisión en 3 dimensiones [29]. 28

Figura3.1.1 Diagrama esquemático de la línea [7]. 31
Figura3.1.2 Disposición del circuito en el terreno [14]. 32
Figura3.1.3 Geometría torre mas representativa de la zona de altura baja [7]. . 34
Figura3.1.4 Geometría torre mas representativa de la zona de altura media [7]. 34
Figura3.1.5 Geometría torre mas representativa de la zona de altura alta [7]. . 35
Figura3.3.1 Cálculo I_{max}. 37
Figura3.3.2 Aplicación MEG. 38
Figura3.4.1 Aplicación MLP para estimación de fallas de apantallamiento. . . 41

Figura4.1.1 ángulo de apantallamiento [5]. 43
Figura4.1.2 Corriente de rayo v/s Ancho expuesto tramo altura baja 46
Figura4.1.3 Corriente de rayo v/s Ancho expuesto tramo altura alta. 46
Figura4.1.4 SFR v/s Corriente de rayo tramo altura baja. 46
Figura4.1.5 SFR v/s Corriente de rayo tramo altura alta. 46
Figura4.1.6 SFR v/s Ancho expuesto tramo altura baja 47
Figura4.1.7 SFR v/s Ancho expuesto tramo altura alta. 47
Figura4.2.2 Modelo líder descendente en plano XZ. 48
Figura4.2.3 Modelo líder descendente en plano YZ. 48
Figura4.2.1 Modelo líder descendente en 3 dimensiones. 49
Figura4.2.4 Puntos de inicio aleatorios. 49
Figura4.2.5 Puntos finales aleatorios. 49
Figura4.2.6 Voltaje inducida en la línea de transmisión. 52
Figura4.2.7 Voltaje en la punta del líder descendente. 52
Figura4.3.1 Impacto lateral de un rayo a un línea de transmisión doblemente apantallada [9]. 55

Índice de tablas

Tabla2.3.1 Parámetros estadísticos para la primera descarga de retorno 22

Tabla3.1.1 Datos cable de guardia de la línea de transmisión 2x220 kV Lagunas-Collahuasi. 32
Tabla3.1.2 Datos técnicos de lso conductores de la línea de transmisión 2x220 kV Lagunas-Collahuasi. 32
Tabla3.1.3 Coordenadas de conductores de fase y cables de guarda [m] 32
Tabla3.1.4 Tensión de ruptura ante impulso negativo para cadena de aisladores 33

Tabla4.1.1 Resultados MEG 42
Tabla4.2.1 Corrientes de rayo para impactos en la línea de transmisión 50
Tabla4.2.2 Impactos de rayos a las fases de la LT, tramos altura baja y media. 51
Tabla4.2.3 Impactos de rayos a las fases de la LT, tramo altura alta. 51
Tabla4.2.4 Resultados aplicación MLP para la estimación de fallas de apantallamiento. 53
Tabla4.3.1 Resultados aplicación MLP para la estimación de fallas de apantallamiento. 54

Resumen

El presente trabajo entrega una comparación entre 2 modelos de apantallamiento de una línea de transmisión ante descargar eléctrica atmosférica. El trabajo se base en la obtención del estado de apantallamiento mediante el modelo electrogeométrico clásico y un modelo basado en el líder progresivo. Se considera en ambos casos una descarga eléctrica de polaridad negativa, por ser la mas frecuente en la naturaleza.

La línea de transmisión en estudio, corresponde a la línea de transmisión Lagunas-Collahuasi, perteneciente a la minera doña Inés de Collahuasi. La LT se ubica en una de las regiones de mas alta actividad eléctrica atmosférica en Chile y actualmente presenta interrupciones en sus operaciones debido a impactos de rayos en su sistema de transmisión.

De los resultados obtenidos se concluye que ambos modelos coinciden en el tramo de mayor grado de apantallamiento y reflejan el apantallamiento que otorga un conductor de altura superior a un conductor de altura mas baja.

Por otra parte, la conclusión respecto al estado de apantallamiento es diferente, el MEG indica que el estado de apantallamiento es adecuado garantizando que no existan impactos a la LT, mientras que el modelo basado en el MLP es deficiente y existen impactos a la LT que generan flameo directo de aisladores.

Finalmente el MLP se asemeja mas a las características físicas de una DEAT en comparación al MEG, pero difiere enormemente en los tiempos de simulación, siendo el MEG el modelo mas aventajado por los cortos periodos de calculo. En la actualidad el MLP requiere validación y un contraste con mejores sistemas de registros de caída de rayos.

Abstract

The present work provides a comparison between 2 models of shielding of a transmission line before atmospheric electric discharge. The work is based on obtaining the shielding state by means of the classical electrogeometric model and a model based on the leader progressive.In both cases, an electrical discharge of negative polarity is considered, as it is the most frequent in nature.

The transmission line under study corresponds to the Lagunas-Collahuasi transmission line, belonging to the mining company Doña Inés de Collahuasi. The LT is located in one of the regions with the highest atmospheric electrical activity in Chile and is currently experiencing interruptions in its operations due to lightning strikes in its transmission system.

From the results obtained, it is concluded that both models coincide in the section with the highest degree of shielding and reflect the shielding that a conductor with a higher height gives to a conductor with a lower height.

On the other hand, the conclusion regarding the shielding state is different, the EGM indicates that the shielding state is adequate, guaranteeing that there are no impacts to LT, while the model based on LPM is deficient and there are impacts to LT that they generate direct flashover of insulators.

Finally, the LPM is more similar to the physical characteristics of a atmospheric electrical discharge in comparison to the EGM, but it differs enormously in the simulation times, the EGM being the most advantageous model due to the short calculation periods. Currently the LPM requires validation and a contrast with better lightning strike recording systems.

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad uno de los fenómenos climáticos que puede afectar la operación de las líneas de transmisión, son las descargas eléctricas atmosféricas (DEAT) o comúnmente conocidas como rayos. Si bien en Chile no es un fenómeno frecuente, existen regiones altas de la cordillera de Los Andes donde la presencia de rayos es común [16] [28].

En los últimos años la minera Doña Inés de Collahuasi reportó fallas en la línea de transmisión, que fueron atribuidas a DEAT. La faena minera se encuentra ubicada a mas de 4700 metros de altura sobre el nivel del mar y es una de las zonas de mas alta actividad eléctrica atmosféricas de Chile, por lo cual un alto estado de apantallamiento de las líneas de transmisión es fundamental, para poder estar protegidos ante la caída de rayos y poder realizar sus procesos productivos con continuidad. El tramo El Salto-Collahuasi, es el que posee mayor información, por lo cual, se centrara el análisis en esta sección de la línea de transmisión.

Para estudiar el proceso de enlace de rayos con el tramo El Lagunas-Collahuasi, se utilizarán dos principales modelos, el modelo electro-geométrico y el modelo del líder progresivo (MLP). El primero se basa principalmente en estudios empíricos, donde se considera que un rayo impactará un objeto en tierra cuando el líder descendente negativo se acerca a una distancia crítica de impacto del objeto, a esta distancia se inicia el líder ascendente positivo [5] [15] . El segundo modelo considera un mayor cantidad de características física del rayo y describe el paso a paso del descenso del líder negativo, además considera que existe un desarrollo de un líder ascendente positivo que se inicia en las puntas de los objetos en tierra y viaja hacia la nube de tormenta en busca del líder descendente negativo, la unión entre los líderes permite que una descarga eléctrica atmosférica impacte al objeto en tierra [32].

El MEG es el modelo mas utilizado para realizar estudios de estado de apantallamiento eléctrico, debido a que es un modelo eficaz al ser comparado con observaciones de campo y también porque utiliza algoritmos sencillos que permiten determinar el estado de apantallamiento en cortos periodos de tiempo. A pesar de su eficacia y simplicidad, es criticado ya que no considera aspectos físicos del rayo, como su tortuosidad o ángulo

de impacto con objetos en tierra, tampoco evalúa el impacto de la oblicuidad del terreno en sus estudios.

El MLP refleja aspectos significativos de la DEAT y describe la ruta que toma el líder descendente negativo hacia tierra, también considera criterios para el inicio del líder ascendente positivo y las condiciones para la unión de ambos líderes. El modelo genera de manera aleatoria o determinista, un paso a paso del líder descendente con la tortuosidad característica de la forma del rayo [32].Si bien es un modelo que refleja bastante bien la física de un rayo, los altos tiempos de simulación son su principal desventaja. Además el MLP no evalúa la tasa de falla del apantallamiento de las líneas de transmisión, pero existen algunos modelos de análisis de apantallamiento que se basan en el MLP para determinar la protección de la línea ante DEAT.

Como se ha mencionado a la hora de realizar estudios de apantallamiento el MEG es elegido por sobre los modelos basados en MLP, a pesar de su falta de aspecto físicos del rayo, debido principalmente a su fácil aplicación y cortos periodos de simulación computacional. A pesar de aquello, con el desarrollo de la versión estocástica del MLP, es posible acortar los tiempos de simulación y así obtener una herramienta que considera aspectos relevantes de la física de la DEAT, para estudiar el estado de apantallamiento de líneas de transmisión. La comparación del MEG con el MLP estocástico, permitirá determinar la importancia de las características físicas del rayo, como lo son tortuosidad, ángulo de incidencia, oblicuidad del terreno y largo del paso del líder descendente en los estudios de apantallamiento considerando cortos tiempos de simulación.

Para determinar la eficacia del MLP estocástico, se comparará con el MEG tradicional presentado en [15], los 2 modelos serán aplicados a la línea de transmisión de la minera Collahuasi, para así obtener su estado de apantallamiento y evaluar si la instalación se encuentra normalizada bajo los estándares internacionales de protección contra rayos. Además se obtendrán estados de apantallamientos que involucran mas aspectos físicos del rayo, asemejándose mas a la realidad, que pudiesen explicar el alza de las salidas de operación de las líneas de transmisión en cuestión y así determinar la eficacia de estos con respecto al MEG tradicional.

A continuación se presentan cada sección de los contenidos desarrollados en este estudio. En el capítulo 1 se presenta una introducción al tema y los objetivos específicos de este trabajo. En el capítulo 2 se detallan las metodologías de estudio de apantallamiento que son utilizadas para realizar los estudios de fallas de las protecciones de rayos para líneas de transmisión. Es importante destacar que los modelos presentados en esta sección no corresponden a un estudio del estado del arte debido a los alcances del trabajo, sin embargo, exponen la base teórica de las actuales metodologías de estudios de apantallamiento ante DEAT. El capítulo 3 corresponde a la aplicación de los modelos de estudio. En el capítulo 4 se presentan los resultados y análisis del trabajo. El capítulo 5 muestra las principales conclusiones obtenidas en el trabajo.

1.1. Objetivos

- Realizar una revisión bibliográfica referente al modelo electro-geométrico (MEG) y el Modelo de Líder Progresivo (MLP) para el estudio de apantallamiento de líneas de transmisión contra rayos.

- Seleccionar un Modelo de Líder Progresivo para la determinación del nivel de apantallamiento contra descargas atmosféricas.

- Determinar el nivel de apantallamiento contra rayos en líneas de transmisión pertenecientes a Collahuasi, mediante la aplicación del MEG y el MLP elegido para el estudio.

- Comparar los resultados del nivel de apantallamiento de las líneas de transmisión obtenidos por medio de los modelos bajo estudio.

Capítulo 2

Antecedentes de las metodologías existentes

2.1. Física de la descarga eléctrica atmosférica

Se define un rayo como una descarga eléctrica natural que se caracteriza por ser una descarga transitoria, con gran magnitud de corriente y que ocurre a una muy alta frecuencia. Esta descarga proviene principalmente de una nube cargada eléctricamente a una altura entre 4 y 7 [km] de altura [25].

El modelo actual mas utilizado, para describir la estructura eléctrica de la nube de tormenta, es el modelo tripolar [6]. Este modelo indica que una nube posee en su parte superior una zona de carga positiva, en su parte central posee una zona de carga negativa, mientras que en su parte inferior posee una zona de un tamaño menor a las anteriores que posee una polaridad positiva. En la Fig.2.1.1 se puede observar las 3 zonas de cargas presentes en la nube de tormenta.

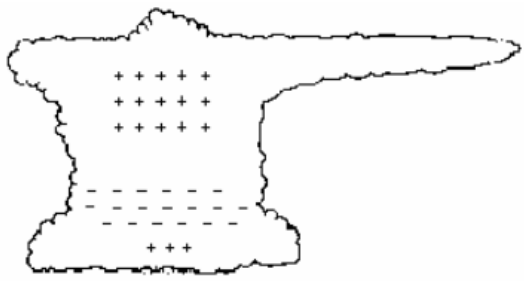

Figura 2.1.1: Modelo tripolar de carga de una nube de tormenta. [6]

Las características eléctricas de la nube de tormenta dan origen a la descarga eléctrica atmosférica (DEAT), las cuales pueden ocurrir entre una nube y la tierra o entre nubes.

Existen 4 tipos de DEAT, las cuales son[17]:

1. Descarga nube-tierra negativa.

2. Descarga nube-tierra positiva.

3. Descarga nube-nube negativa.

4. Descarga nube-nube positiva.

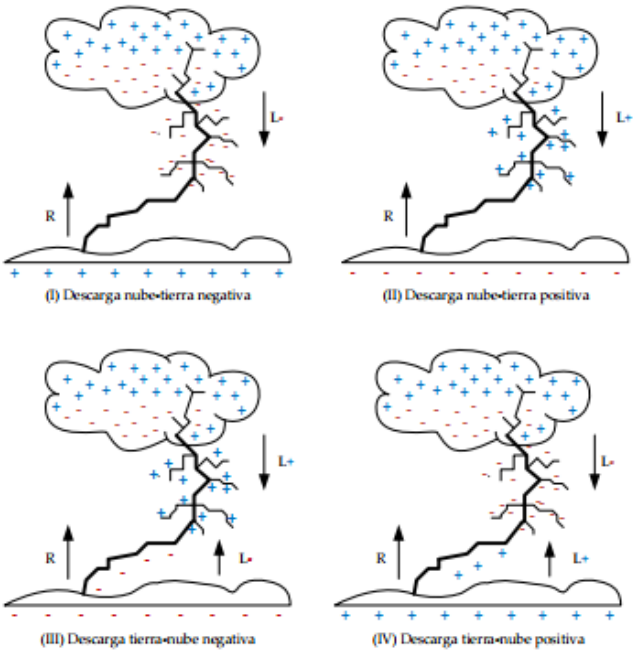

Figura 2.1.2: Tipo de descarga nube-tierra [17].

Las descargas nube-tierra toman mayor importancia, ya que pueden afectar la salud de los seres vivos y producir daños en las instalaciones del sistema eléctrico. De acuerdo con [26], las descargas eléctricas entre nube-tierra de polaridad negativa son las mas comunes, su proporción de ocurrencia alcanza valores entre 90 % y 95 %, mientras que las DEAT nube-tierra de polaridad positiva alcanzan proporciones de ocurrencia entre el 5 % y 10 %.

Además de las proporciones de ocurrencia entre las descargas nube-tierra negativa y positiva, existen otras diferencias importantes, los rayos de polaridad negativa poseen una menor amplitud de corriente, alcanzando un valor promedio de 33 [kA], mientras que el rayo de polaridad opuesta posee una amplitud de corriente aproximadamente 10 veces mayor, alcanzando los 300[kA]. La región de origen de la descarga positiva toma lugar en la parte superior de la nube de tormenta, mientras que la descarga negativa se origina en la parte central de dicha nube, lo anterior es bastante congruente con el modelo tripolar.

A pesar de las claras diferencias entre las descargas positiva y negativa, ambas se propagan por medio de un líder escalonado, que desciende de la nube hacia tierra con una velocidad entre 1 y 4 $\cdot 10^{-5}$[m/s], promediando 2 $\cdot 10^{-5}$[m/s][26].

2.2. Proceso de la descarga eléctrica atmosférica.

Como se mencionó anteriormente, el rayo descendente nube-tierra es la descarga mas frecuente de todas y provoca los mayores daños en la superficie terrestre, es por ello, que es el principal objeto de estudio de las teorías de apantallamiento ante descargas eléctricas atmosféricas.

La descarga negativa posee las siguientes etapas aceptadas por la comunidad científica [26]:

1. Encendido de la descarga.
2. Líder escalonado.
3. Proceso de enlace.
4. Primera descarga de retorno.
5. Proceso K y J.
6. Líder dardo.
7. Descargas subsecuentes.

Para encontrar el punto donde un líder descendente impacta la superficie de la tierra, sólo se consideran las 3 primeras etapas, aunque el modelo electrogeométrico solo considera el proceso de enlace para encontrar la distancia mínima de impacto entre el rayo y las líneas de transmisión. Debido a los objetivos de este trabajo, sólo se profundizará en las 3 etapas iniciales del proceso de la DEAT.

2.2.1. Encendido de la descarga.

Para explicar esta etapa de la DEAT, se requiere definir el concepto de **streamer**. Se entenderá como streamer a una concatenación de avalanchas de electrones debido a la presencia de un campo eléctrico no homogéneo. La concatenación permite la aparición de descargas en formas de filamentos capaces de conducir corriente eléctricas [8].

El inicio de la DEAT se debe a la interacción de streamers dentro de la nube, los streamers son provocados por los altos campos eléctricos allí presentes (0.1-1 MV/m) [26]. La propagación de los streamers genera la reorganización de la carga en la parte baja de la nube y la formación de un canal eléctrico, a partir del cual comienza a desarrollarse el líder descendente.

El rayo se inicia cuando se genera la propagación simultanea de streamers positivos ascendentes y negativos descendentes.

De acuerdo con mediciones de variación de campo eléctrico o determinando las fuentes de radiación de alta frecuencia en el encendido de la descarga, se puede encontrar el punto de origen de la DEAT. Estudios localizan el origen de la DEAT mediante pulsos de alta frecuencia concluyendo que la descarga se inicia entre 4-7 km de altura con respecto al nivel del mar [25].

2.2.2. Líder escalonado.

El líder del rayo esta compuesto, por un núcleo de plasma altamente conductivo con un radio entre 0.01 y 0.5 [m]. El canal de plasma posee un temperatura alta que evita que decaiga y que se disipe, dicho núcleo es rodeado por un envolvente de corona de varios metros de diámetro.El radio promedio total del rayo es de 3 [m] [2] [32].

El modelo mas aceptado por la comunidad científica, para describir la DEAT, es el modelo del líder bipolar[18], el cual, indica que la propagación de los streamers formados en el encendido de la descarga produce un líder bipolar y bidireccional que se mueve en direcciones opuestas, la carga de cada uno de los canales es de igual magnitud y de polaridad opuesta, es decir, la carga neta del líder es cero y no hay transferencia de carga de la nube al líder. El canal negativo se extiende hacia la superficie de la tierra tomando una forma tortuosa y con ramificaciones, mientras que el canal del líder positivo se propaga en el interior de la nube, la forma del canal positivo no posee tortuosidad.

La punta del líder descendente posee un campo eléctrico mayor a 2 [MV/m], el cual permite la formación de streamers negativos que se propagan dentro de una región de menor campo. Durante el avance del líder descendente, este deja atrás carga espacial positiva contigua a la punta del último paso del líder, esta carga positiva se va acumulando y aumentando, de igual forma que el campo eléctrico de la punta cargada negativamente. Cuando el campo de la punta alcanza un valor crítico ocurre una disrupción entre esas dos

regiones de carga, la cual forma un nuevo paso del líder extendiendo el núcleo altamente conductivo [32].

2.2.3. Proceso de Enlace.

La aproximación del líder descendente hacia la tierra, genera un incremento del campo eléctrico en objetos o estructuras presentes en la superficie, especialmente sobre puntas y esquinas. Al aumentar el campo, existe la posibilidad de que se generen líderes ascendentes de conexión de polaridad opuesta al líder descendente, estos líderes ascendentes se propagan por el aire en busca de interceptar el líder descendente y completar el proceso de enlace. Es importante señalar que solo un líder positivo se conectará con el líder que se aproxima a tierra [32].

Como se ha mencionado antes, los rayos negativos nube-tierra son los mas frecuentes y también son los que se tienen en consideración en las teorías de apantallamiento de líneas eléctricas ante DEAT, por lo cual, este trabajo solo se centrará en este tipo de descargas. De acuerdo con lo anterior, solo existirán líderes descendentes negativos y líderes ascendentes positivos. El proceso de enlace necesita varias condiciones para ser completado, las cuales se detallan y explican a continuación.

Inicio y propagación de streamers.

El aumento del campo eléctrico en los objetos o estructuras en tierra debido al descenso del líder negativo, genera una ionización del aire, principalmente sobre las puntas, regiones donde se concentran las mayores intensidades de campo, luego ocurre una avalancha de cargas y cuando el campo eléctrico supera un valor crítico (cercano a 3 [MV/m] [10]), se produce la formación de streamers.

Peek [24] considera que el el inicio de streamers se produce cuando se da inicio a la actividad corona, derivó la siguiente ecuación para calcular el campo eléctrico crítico:

$$E_c = 3{,}15 \cdot 10^4 \cdot \delta \cdot (1 + \frac{0{,}305}{\sqrt{\delta \cdot r_c}}) \tag{2.2.1}$$

Donde E_c es el campo crítico de inicio de actividad corona [kV/m], δ es la densidad relativa del aire [kg/m^3] y r_c [m] es el radio interno del conductor.

De acuerdo con las pruebas de laboratorio del grupo Renardieres [21], el campo eléctrico promedio que se extiende de los streamers, se encuentra entre 400-500 [kV/m]. Este último valor de campo se eléctrico considera el mínimo necesario para que una propagación de los streamers positivos sea sostenida y estable.

Transición de streamers a líder y su propagación.

Los streamers poseen baja energía y corriente, por lo cual, no permiten calentar el aire a la temperatura requerida para hacerlo conductivo, sin embargo debido a que los stremears en su mayoría poseen un canal común como raíz llamado tronco, las corrientes pequeñas recorrerán el tronco y se sumarán aumentando la temperatura, aumentando la ionización y produciendo electrones. Finalmente el tronco se convierte en un canal de mayor energía, temperatura y conductividad que recibe el nombre de líder [32].

Cuando se forma el líder, el proceso continua con la generación de mas streamers positivos que emanan desde su punta y se irán extendiendo hacia las zonas donde la solicitación de campo eléctrico sea igual al valor mínimo requerido para que se inicie la propagación [32]. La propagación del líder ascendente depende de la distribución de potencial en las regiones frente a su punta.

El cumplimiento del campo crítico de inicio de líder ascendente es un requisito necesario pero no suficiente para mantener una propagación estable, la otra condición para lograr una propagación estable del líder ascendente es que el campo eléctrico alcancé un valor crítico de estabilización.

Lalande [20] propuso que el campo de estabilización que depende de la altura de la estructura y estimó la siguiente expresión:

$$E_{estable} = \frac{240}{1 + \frac{h}{10}} + 12 \tag{2.2.2}$$

Donde $E_{estable}$ [kV/m] es el campo crítico de estabilización y h [m] es la altura de la estructura.

Por otra parte, Rizk [27] propuso una formula para estimar el voltaje inducido necesario para el inicio y propagación de un líder positivo estable para conductores horizontales.

$$U_c = \frac{2247}{1 + \frac{5{,}15 - 5{,}49 ln(a)}{d \cdot ln(\frac{2 \cdot d}{a})}} \tag{2.2.3}$$

Donde U_c es el voltaje inducido [kV], **a** [m] corresponde al radio del conductor, mientras que **d** [m] es el largo del conductor.

Conexión entre líderes descendente y ascendente.

La conexión entre líderes es el último paso de la DEAT y es conocido como el **Salto Final**. Para completar esta última etapa con éxito, los líderes descendente y ascendente deben alcanzar un gradiente de potencial entre sus puntas, el cual debe ser mayor o igual a 500 [kV/m] [2] [32]. El salto final además de depender de la distribución de potencial, depende de la dirección y velocidad de ambos líderes. Existe la posibilidad de que se origine un líder ascendente positivo, propagándose de manera estable, pero que no se encuentre con el líder descendente, por lo cual, no se completaría el salto final y no habría DEAT.

2.3. Modelo Electrogeométrico

Este modelo se basa en el proceso de enlace del rayo con las estructuras en tierra, determinando el punto de impacto de un rayo con el objetivo de prestar apantallamiento en LAT, por medio de la ubicación del cable de guarda. Cuando el líder escalonado se aproxima a tierra, alcanza una distancia crítica con respecto a las estructuras en la superficie, a esta distancia el gradiente de potencial es igual al gradiente crítico, lo que provoca una disrupción en el aire y se genera la unión entre el rayo y la estructura. La distancia disruptiva crítica se conoce como **Distancia de impacto** [1] [5]. Como el proceso de enlace del rayo considera la emanación de un líder ascendente positivo desde las estructuras a medida que el líder descendente negativo se aproxima a tierra, se entenderá como distancia de impacto, a la distancia que existe entre el líder descendente y la estructura que será impactada por el rayo, en el instante que se inicia el líder ascendente. El modelo considera que el descenso del líder escalonado no se ve afectado por lo que ocurre en la superficie de la tierra [4].

El criterio de inicio del líder ascendente se determina en la práctica, por medio del valor de corriente máxima de la descarga. La relación entre la distancia de impacto y la corriente se presenta, a través, de la siguiente expresión [1] [4] [5]:

$$S(I_1) = A \cdot I_1^B \tag{2.3.1}$$

En la expresión **S** [m] corresponde a la distancia de impacto, mientras que I_1[kA], es la corriente máxima en la descarga. Los parámetros **A** y **B** corresponden a constantes empíricas que se determinan según el punto de termino del rayo y la magnitud de corriente de la descarga. Los valores dados por las normas internacionales [5] [15] , corresponden a **A**=10 [-] y **B**=0.65 [-].

La distancia **S** [m] también se puede expresar, por medio, de la distancia crítica a tierra S_g [m] y viene dada por la siguiente expresión [15]:

$$S(I) = A \cdot I_1^B = \gamma \cdot S_g \cdot (I_1) \tag{2.3.2}$$

El parámetro γ [-] representa que tan atractiva es la tierra con respecto a las estructuras, ante la presencia de un rayo. En este trabajo se considera que la tierra como los objetos en ella presentan la misma probabilidad de que un rayo las impacte, por ello, γ=1 [15].

En la Fig. 2.3.1 presenta un esquema de la **Distancia de impacto** y la **Distancia de impacto a tierra**.

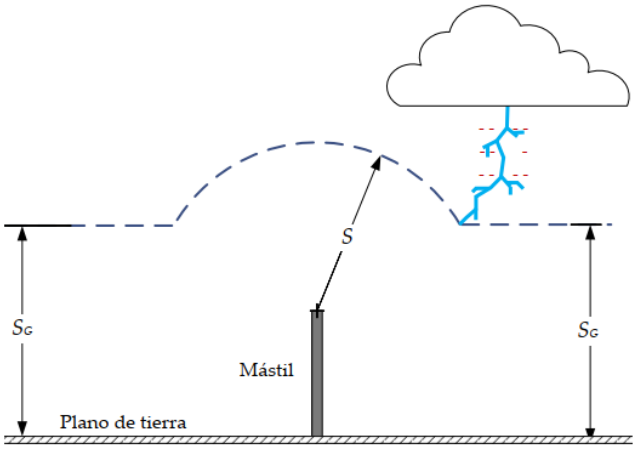

Figura 2.3.1: Concepto de distancia de impacto [17]

2.3.1. Aplicación conductor sin apantallar

La aplicación del MEG se basa en determinar el punto de impacto de una distancia vertical que posee una determinada corriente I [kA], para ello se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. A partir de una corriente I [kA], se calculan las distancias S [m] y S_g [m].

2. Se dibuja una línea paralela a la tierra, con una altura de S_g [m].

3. Se dibuja una semicircunferencia cuyo centro es la posición del conductor y su radio equivale a S [m].

4. Se identifica el arco formado por la intersección entre la semicircunferencia y la línea paralela a la tierra.

5. Se determina la distancia que existe entre el centro del conductor y los puntos de intersección identificados previamente.

En la Fig. 2.3.2 se presenta una conductor conectado a tierra de largo L [km], ubicado horizontalmente sobre el suelo a una altura h [m]. Cuando una descarga vertical intercepta el arco de blindaje Q'Q, dicha descarga impacta el conductor, mientras que cuando la descarga vertical cae fuera del arco Q'Q, esta impactará la tierra.

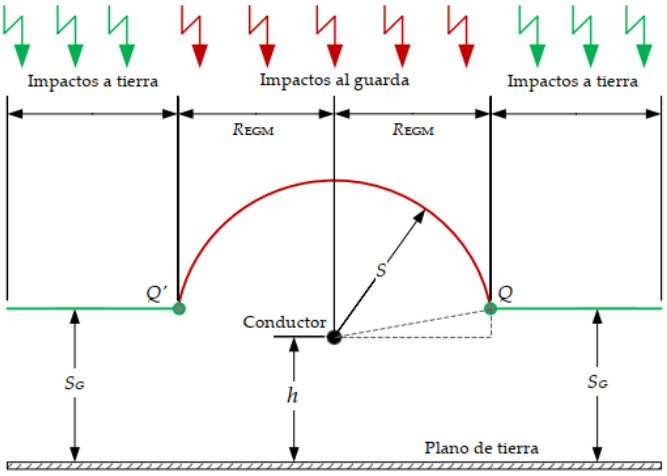

Figura 2.3.2: Conductor sin apantallar [17]

Dicho de otra forma, cualquier descarga vertical que descienda a una distancia horizontal mayor a R_{EGM} medida desde el conductor, terminará en tierra. La distancia R_{EGM}[m] se conoce como la **Distancia lateral atractiva** y se define como la mayor distancia horizontal medida desde un objeto en tierra a la que espera que ocurra el proceso de enlace del rayo [5].

La distancia lateral atractiva R_{EGM}[m] viene dada por la siguiente expresión [17]:

$$R_{EGM} = \begin{cases} \sqrt{(1-\frac{1}{\gamma^2})\cdot S^2 + (\frac{2}{\gamma}\cdot h)\cdot S - h^2}, & S_g > h \\ S, & S_g \leq h \end{cases} \tag{2.3.3}$$

Se define el **Ancho expuesto** como la distancia horizontal total de exposición, en este caso se entiende como dos veces la **Distancia lateral atractiva** [17].

El análisis anterior se puede extrapolar a líneas de mas conductores, pero se debe considerar el solapamiento ente las distancias lateral atractiva de cada conductor.

El número de impactos al conductor para una corriente específica viene dada por [5]:

$$N_s(I) = GFD \cdot 2 \cdot R_{EGM} \cdot L \tag{2.3.4}$$

Dada la Ec. 2.3.4, el valor de la expresión $2 \cdot R_{EGM}$[km] corresponde al **Ancho de atracción** del conductor y la cantidad $2 \cdot R_{EGM} \cdot L$ $[km^2]$ corresponde al **Área de**

captación de descargas, multiplicando esta última por la densidad de rayos al terreno GFD [$rayos/km^2$/año], se obtiene el número de impactos a la línea. Al considerar la probabilidad de que la corriente ocurre es $f_1(I) \cdot dI$, se puede calcular la cantidad de impactos totales a la línea como [5]:

$$N_s = 2 \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{min}}^{\infty} R_{EGM} \cdot f_1(I) \cdot dI \tag{2.3.5}$$

2.3.2. Aplicación línea monofásica apantallada

En la Fig. 2.3.3 se presenta una línea monofásica apantallada [17], en el punto **o** se ubica el cable de guarda con una altura h_o [m], mientras que en **u** se ubica el conductor de fase con altura h_u [m]. El parámetro α corresponde al ángulo de apantallamiento medido en grados, el parámetro Δ [m] corresponde a la separación horizontal entre el cable de guarda y el conductor de fase.

Se identifica el arco Q"Q' como el arco de blindaje y Q'Q es el arco expuesto. Si un rayo intercepta el arco de blindaje, el rayo impactará cable de guarda, mientras que cuando el rayo intercepta el arco expuesto, el rayo impactará al conductor de fase. Finalmente si el rayo no impacta ninguno de los dos arcos, la descarga terminará en la tierra.

A partir de la definición de los arcos expuestos y de blindaje, se pueden determinar las distancias laterales atractivas del cable de guarda, del conductor de fase y la distancia atractiva del solapamiento entre ambos conductores.

La distancia R_{EGM} [m] corresponde a la distancia lateral atractiva del conductor de fase, R_{EGM3} [m] corresponde a la distancia lateral del cable de guarda, finalmente R_{EGM2} [m] es la distancia lateral atractiva del cable de guarda considerando el solapamiento entre los arcos de blindaje y de exposición [17].

Una vez definidas las 3 distancias laterales atractivas antes mencionadas, se puede determinar los anchos de exposición. Los parámetros W_o [m] y W_u [m] corresponden a los anchos expuestos del cable de guarda y el conductor de fase respectivamente.

El modelo considera que si una descarga vertical cae dentro de W_o, el rayo impacta el cable de guarda, mientras que si la descarga vertical cae dentro de W_u el rayo impacta al conductor de fase. En el caso de que el rayo no caiga en W_o ni en W_u se considera que el impacto será en la tierra.

Los anchos expuestos se pueden entender a través de las siguientes expresiones [17]:

$$W_o = R_{EGM2} + R_{EGM3} \tag{2.3.6}$$

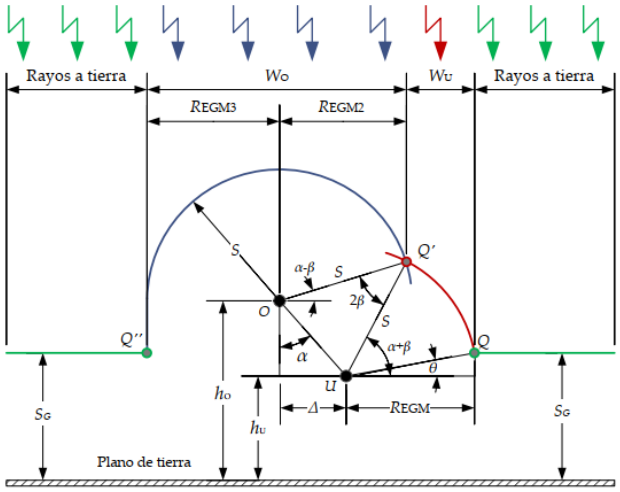

Figura 2.3.3: Línea monofásica apantallada [17]

$$W_u = R_{EGM} + \Delta - R_{EGM2} \tag{2.3.7}$$

Considerando que la descarga solamente tomará trayectoria vertical, se puede encontrar la probabilidad P_o de que el rayo impacte el cable de guarda y la probabilidad P_u de que el rayo impacta el conductor de fase. Luego ambas probabilidades se definen como [17]:

$$P_o = \frac{W_o}{W_o + W_u} \tag{2.3.8}$$

$$P_u = \frac{W_u}{W_o + W_u} \tag{2.3.9}$$

De la geometría de la Fig. 2.3.3 se obtienen las siguientes expresiones [17]:

$$R_{EGM} = \begin{cases} S \cdot \cos\theta, & S_g > h_u \\ S, & S_g \leq h_u \end{cases} \tag{2.3.10}$$

$$R_{EGM2} = \Delta + S \cdot \cos(\alpha + \beta) = S \cdot \cos(\alpha - \beta) \tag{2.3.11}$$

$$R_{EGM3} = \begin{cases} \sqrt{S^2 - (S_g - h_o^2)}, & S_g > h_o \\ S, & S_g \leq h_o \end{cases} \tag{2.3.12}$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{S_g - h_u}{S}\right) \tag{2.3.13}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (h_o - h_u)^2}}\right) \tag{2.3.14}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\Delta^2 + (h_o - h_u)^2}}{2 \cdot S}\right) \tag{2.3.15}$$

2.3.3. Aplicación línea trifásica apantallada

Para el caso de un línea trifásica apantallada, se toma como referencia la Fig. 2.3.4, en la cual, se presenta una línea de 3 conductores de fase y 2 cables de guarda. En los puntos **U"**, **U'** y **U"** se ubican los conductores de fase, mientras que en **O'** y **O** se ubican los cables de guarda. En la Fig. 2.3.4 se trazan los arcos con centro en los conductores de fase y en los cables de guarda, se establece un radio de S determinado por la corriente de la descarga. También se presenta la línea horizontal paralela a la tierra con altura de S_g. Los arcos Q""Q"' y Q'Q corresponden a los arcos expuestos, es decir, cualquier descarga que intercepte estos arcos impactará los conductores de fase. Los arcos Q"'Q" y Q"Q' corresponden a los arcos blindados, es decir, una descarga que intercepte estos arcos, terminará impactando los cables de guarda.

Además de identificar los arcos expuestos y blindados, se establecen las distancias W_u y W_o, como los anchos expuestos y anchos blindados, cualquier rayo con trayectoria vertical que descienda en el ancho W_u, impactará los conductores de fase, este tramo corresponde a la falla del apantallamiento. De la misma forma que en el ancho expuesto, cualquier rayo que descienda con trayectoria vertical en el ancho W_o, los cables de guardas serán impactados por la descarga. Finalmente se identifica la distancia W que corresponde a la separación de cables de guarda, este parámetro toma gran importancia, ya que, con la adecuada separación de los cables de guarda, el conductor de fase central siempre estará apantallado y no será impactado por una DEAT.

A continuación se presentan las expresiones para P_o y P_u, que representan las probabilidades de que un rayo impacte los cables de guarda y a los conductores de fase respectivamente.

$$P_o = \frac{2 \cdot W_o + W}{2 \cdot W_o + 2 \cdot W_u + W} = \frac{W_o + \frac{W}{2}}{W_o + W_u + \frac{W}{2}} \tag{2.3.16}$$

$$P_u = \frac{2 \cdot W_u + W}{2 \cdot W_o + 2 \cdot W_u + W} = \frac{W_o + \frac{W}{2}}{W_o + W_u + \frac{W}{2}} \tag{2.3.17}$$

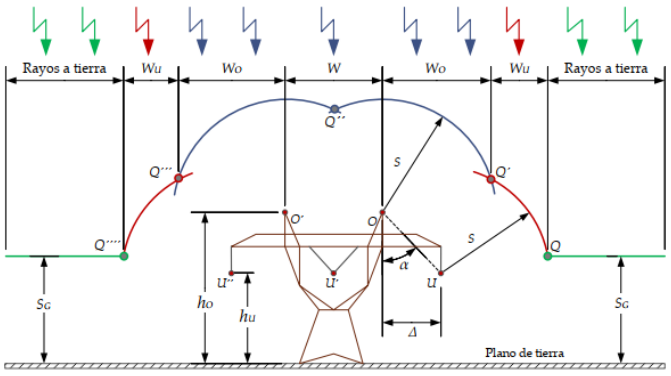

Figura 2.3.4: Línea trifásica apantallada [17]

2.3.4. Corriente de falla máxima de falla de apantallamiento

A medida que aumenta la corriente de la descarga, van aumentando las distancias de S y S_g, siguiendo esta lógica, existe un valor de corriente para el cual el arco y el ancho expuesto tienen valor cero y no existirá impacto de rayos en el conductor de fase. Se define la **Corriente máxima de falla de apantallamiento** I_{max}, como el valor máximo de corriente por encima de la cual no habrá impacto de rayos al conductor de fase [1] [5].

En la Fig. 2.3.5 se explica el concepto de corriente máxima de manera gráfica, en ella, se puede apreciar que al incrementar la corriente el arco expuesto QQ' va disminuyendo hasta llegar a cero, de la misma forma el ancho expuesto W_u llega a cero a un determinado valor de corriente [5].

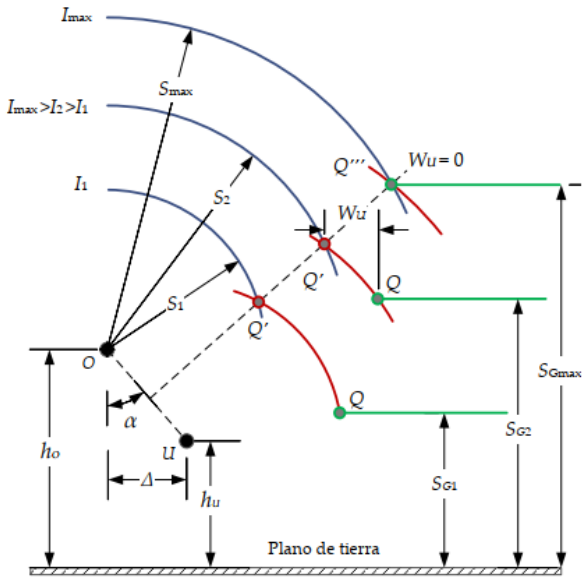

Figura 2.3.5: Corriente máxima de apantallamiento perfecto [17]

A partir de la geometría de la Fig. 2.3.5 se pueden obtener las siguientes expresiones para la distancia lateral atractiva máxima del cable de guarda y del ancho blindado[17]:

$$R_{EGMmax} = \begin{cases} \sqrt{S_{max}^2 - (S_{gmax} - h_o^2)}, & S_{gmax} > h_o \\ S_{max}, & S_{gmax} \leq h_o \end{cases} \tag{2.3.18}$$

$$W_{omax} = 2 \cdot R_{EGMmax} \tag{2.3.19}$$

También se obtiene la relación entre la corriente máxima de falla de apantallamiento y la distancia máxima de impacto a tierra S_{gmax}[m][17].

$$S_{gmax} = \frac{h_o + h_u}{2 \cdot k_o} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - k_o \cdot \left(1 + \frac{\Delta^2}{(h_o + h_u)^2}\right)}\right) \tag{2.3.20}$$

$$k_o = 1 - (\gamma \cdot \sin \alpha)^2 \tag{2.3.21}$$

El número total de impactos contra el cable de guarda, se calcula mediante la siguiente expresión [5]:

$$N_o = \frac{GFD \cdot L}{1000} \cdot \left[\int_{I_{min}}^{I_{max}} W_o \cdot f_1(I) \cdot dI + \int_{I_{max}}^{\infty} W_o \cdot f_1(I) \cdot dI\right] \tag{2.3.22}$$

Finalmente considerando lo expuesto anteriormente, se puede encontrar la corriente máxima I_{max}[kA], mediante la siguiente expresión [17]:

$$I_{max} = (\frac{\gamma \cdot S_{gmax}}{A})^{\frac{1}{B}} \tag{2.3.23}$$

2.3.5. Ángulo apantallamiento perfecto

Se entiende como **Ángulo perfecto de apantallamiento**, al ángulo de apantallamiento para el cual, se evitará una salida de operación de la línea debido a una falla de apantallamiento. Este ángulo se obtiene cuando la **Corriente de falla máxima** I_{max}[kA] es igual a la **Corriente crítica** I_{crit}[kA].

Se define como **Corriente crítica** I_{crit}[kA], a la corriente mínima para causar flameo de aisladores, se obtiene mediante la impedancia característica del conductor Z_u[Ω] y la tensión crítica de flameo de aisladores U_{crit} [kV] [17]:

$$I_{crit} = \frac{2 \cdot U_{crit}}{Z_u} \tag{2.3.24}$$

El valor de U_{crit} depende del tipo y número de aisladores de la línea de transmisión. El valor de U_{crit} puede ser obtenido de las especificaciones técnicas de los aisladores de la línea de transmisión.

Z_u se obtiene mediante la siguiente expresión [23]:

$$Z_u = 60 \cdot \ln \frac{R_c}{r_c} \tag{2.3.25}$$

Donde:

- r_c [m] es el radio del conductor.
- R_c [m] es el radio corona del conductor.

El valor de r_c se obtiene de las características técnicas de las LT. Mientras que el radio corona del conductor se puede aproximar como R_c= 2*H, donde H [m] es la altura promedio del conductor[23].

Finalmente el ángulo de apantallamiento perfecto [^{o}] se obtiene por medio de la siguiente expresión [17]:

$$\alpha_{perf} = \frac{1}{2} \cdot \left[\arcsin\left(\frac{1}{\gamma} - \frac{h_o}{A \cdot I_{crit}^B}\right) + \arcsin\left(\frac{1}{\gamma} - \frac{h_o}{A \cdot I_{crit}^B}\right) \right] \tag{2.3.26}$$

2.3.6. Evaluación de la tasa de salidas por falla de apantallamiento

La tasa de falla de apantallamiento SFR_1 (por su sigla en inglés) de una línea de transmisión ante una DEAT, esta definida, por el número de descargas que impactan contra los conductores de fase de la línea durante un año, es decir, se mide en [rayo/año]. Considerando que cada descarga posee una corriente de retorno específica I[kA], se puede obtener la tasa de falla de una línea de transmisión de largo L [km], por medio de la siguiente expresión [5] [15]:

$$SFR_1(I) = 2 \cdot GFD \cdot \frac{W_u}{1000} \cdot L \cdot f_1(I) \tag{2.3.27}$$

Se entenderá a W_u[km] como el ancho expuesto del conductor de fase, calculado por medio de la corriente I[kA], mientras que GFD [rayos/km^2/año] es la densidad de rayos a tierra en la zona donde se localiza la línea, finalmente se requiere de la función de densidad de probabilidad $f_1(I)$.

Para poder encontrar la tasa total de falla de apantallamiento, se utiliza la siguiente expresión [5] [15]:

$$SFR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_0^{\infty} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \tag{2.3.28}$$

CIGRÉ [4] afirma que se debe considerar una corriente mínima I_{min} para las descargas de retorno, la cual esta entre 1 y 2 [kA].

Como se mencionó anteriormente el apantallamiento que impide que cualquier descarga impacte un conductor de fase, viene dada por una corriente máxima de falla de apantallamiento I_{max}, por lo cual, la Ec. 2.3.28, se puede escribir de la siguiente forma [5][15]:

$$SFR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \tag{2.3.29}$$

La tasa total de falla de apantallamiento SFR_1 representa el número de impactos de rayos a la línea de transmisión en un año, pero se debe tener en cuenta que no todas las descargas producirán un flameo o un flameo inverso de aisladores, por lo cual, surge la necesidad de definir la **Tasa anual de flameo por fallas de apantallamiento SFFOR** (por su sigla en inglés), dicha tasa se puede obtener al cambiar el parámetro de la corriente mínima I_{min} por la corriente crítica de flameo I_{crit} y se obtiene la siguiente expresión [5][15]:

$$SFFOR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \tag{2.3.30}$$

El valor de SFFOR representa el número de descargas anuales que impactarán contra el conductor de fase y además causarán el flameo de los aisladores. Este parámetro se puede expresar de forma estandarizada como la **Tasa anual de flameos por fallas de apantallamiento para cada 100 km de línea** [5][15]:

$$SFFOR_1 = \frac{2 \cdot GFD}{10} \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \tag{2.3.31}$$

La función de densidad de probabilidad $f_1(I)$ [-], corresponde a la probabilidad de que la corriente de la descarga tome el valor de I[kA], se define por medio de la siguiente expresión [1] [4]:

$$f_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot I \cdot \sigma_{ln(I)}} \cdot e^{-0{,}5 \cdot \frac{ln(I) - ln(\overline{I})}{\sigma_{ln(I)}}} \tag{2.3.32}$$

Donde $\sigma_{ln(I)}$ [-] corresponde a la desviación estándar del ln(I), mientras que $\overline{I}$ [kA] corresponde a la corriente promedio de la primera descarga. En la Tabla 2.3.1 se presentan los valores entregados por IEEE [5] para los parámetros estadísticos antes mencionados.

Parámetros	I $\leq$ 20 [kA]	I >20 [kA]
$\sigma_{ln(I)}$	1.33	0.605
$\overline{I}$	61.1	33.3

Tabla 2.3.1: Parámetros estadísticos para la primera descarga de retorno

Las expresiones anteriores para el cálculo de $SFFOR_1$, requieren de integración númerica, por lo que Anderson propuso una expresión que simplifica el cálculo de la SFFOR [17]:

$$SFFOR_1 = 0{,}1 \cdot GFD \cdot W_u(I_{crit}) \cdot [P_1(I_{crit}) - P_1(I_{max})] \tag{2.3.33}$$

Siendo W_u corresponde el ancho expuesto para la corriente crítica de flameo, P_1 es la probabilidad acumulada y se define como la probabilidad de que la corriente de la primera descarga de retorno sea mayor que I.

El cálculo de la probabilidad se hace por medio de una aproximación a la distribución sugerida por CIGRÉ que se obtiene por medio de la siguiente expresión[4]:

$$P_1(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2{,}6}} \tag{2.3.34}$$

Estas expresiones se pueden aplicar para los modelos geométricos y para los modelos genéricos.Se recomienda un valor de diseño para el SFFOR de 0.05 [rayo/año] por cada 100 km-año [1] [4] [5].

De acuerdo con [1] [4] [5] el GFD [Rayos/km^2] se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$GFD = 0{,}04 * T_d^{1{,}25} \tag{2.3.35}$$

Donde T_d son los días de tormenta al año o nivel ceráunico.

2.4. Modelo de estimación de fallas de apantallamiento basado en MLP

Este modelo desarrolla un método para la estimación de las fallas del apantallamiento de una linea de transmisión utilizando el modelo del líder progresivo en 3 dimensiones.

El modelo describe el paso a paso del rayo y calcula el campo eléctrico entre la punta del líder descendente en cualquier posición del espacio y el conductor de fase, cable de guarda o tierra. A medida que el líder descendente se aproxima a tierra, se evalúa el inicio y propagación de un líder ascendente desde los objetos presentes en la superficie, si existe un líder ascendente que se propague de forma continua hacia el encuentro con el líder descendente negativo y existe un campo eléctrico entre las puntas de ambos líderes, que exceda un valor crítico de ruptura dieléctrica del aire, ocurre el encuentro entre los líderes y se genera el impacto del rayo con el objeto en tierra.

A continuación se presenta el modelo del líder progresivo utilizado en este estudio, además se detallan los criterios de inicio y propagación del líder ascendente positivo, el modelo de la línea de transmisión y el método de estimación de fallas de apantallamiento.

2.4.1. Modelo del líder progresivo

Para describir la trayectoria del líder descendente negativo, se considera un modelo estocástico de 3 dimensiones basado en observaciones de campo que refleja la tortuosidad característica del rayo [32].

En el caso del líder ascendente positivo que se desarrolla en el interior de la nube, se ha observado que presenta una geometría predominantemente horizontal y ramificada [25] [30] . Shao [19] en sus mediciones se percató que los canales ascendentes se desarrollan primero a partir del punto de inicio de la descarga, por lo tanto, el líder ascendente positivo se describe con un canal vertical principal de 500 [m] de longitud, del cual se derivan cuatro ramas horizontales de 1.6[km] cada una con un inclinación de 10[^{o}].

Las principales características del líder descendente negativo son la tortuosidad y la ramificación [32], las cuales se detalla a continuación:

1. **Tortuosidad**: Se genera aleatoriamente el canal tortuoso, de forma consecutiva en cada paso del líder hasta completar el recorrido hacia tierra. Este modelo se realiza por medio de coordenadas esféricas para lograr un modelo en 3 dimensiones(Fig. 2.4.1), para ello se consideran los siguientes lineamientos:

    a) La coordenada ϕ representa el cambio de dirección del canal con respecto a la propagación vertical. El cambio de dirección del canal tortuoso fue descrito por medio de una distribución Gausiana con media de 180 [^{o}], cuya desviación

estándar se ajusta para que el valor absoluto del cambio de dirección fuera aproximadamente 17[^{o}] [26] [6].

b) La coordenada ρ representa el largo del paso del líder descendente, para el cual no existe una distribución aleatoria predominante, ya que se conoce solo el rango en que puede variar el paso del líder ([10[m]-100[m) [11] [12] y no existe mayor información al respecto. Por esta razón se genera el largo del paso del líder por medio de una distribución uniforme.

c) La coordenada θ se describe por medio de una distribución uniforme que varia entre 0 y 360 [^{o}], permitiendo extender el canal del rayo en 3 dimensiones.

2. **Ramificación**: De acuerdo con los análisis recopilados en [32], se encontró que el ángulo típico de las ramificaciones era de 45[^{o}] con respecto a la vertical, mientras que el 50 % de los rayos presentan entre 2 y 3 ramas. Siguiendo el numeral anterior las ramas se generan de manera aleatoria considerando una propagación de 45[^{o}] respecto a la vertical y la longitud de sus pasos viene dada por una distribución uniforme que esta limitada entre 10 [m] y 50 [m].

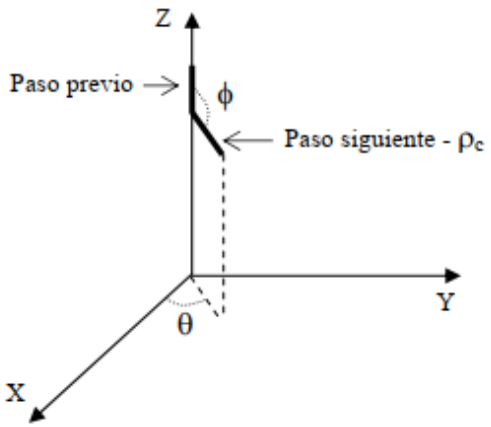

Figura 2.4.1: Modelo 3D Líder descendente [32].

2.4.2. Modelo del líder descendente

Para poder evaluar los criterios de inicio y propagación del líder ascendente, se requiere conocer la carga eléctrica contenida en el líder descendente. La densidad de carga encuentra su máximo valor en la punta del líder, mientras que su valor mas bajo se encuentra en la parte baja de la nube de tormenta, diversos estudios han establecido que el decaimiento de carga eléctrica es de forma exponencial [13], pero en este estudio se considera un decaimiento lineal de la carga, con la finalidad de simplificar el calculo.

Cada paso del líder se modela por medio de cargas lineales y la punta del líder se modela por medio de una forma semiesférica con radio r_0 [m]. En la Fig. 2.4.2 se presenta el modelo del líder descendente considerado por este modelo [10].

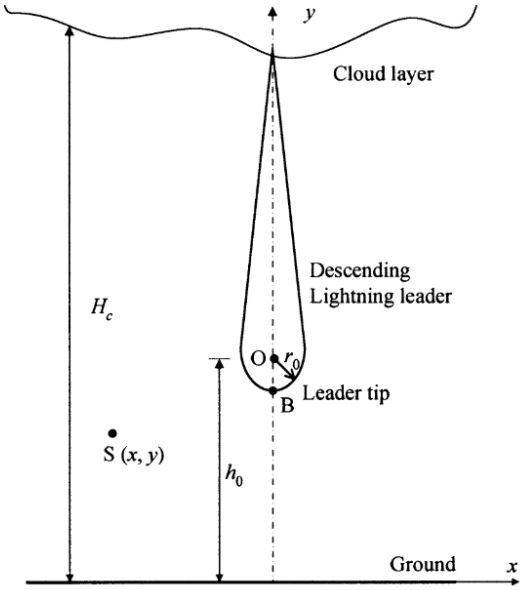

Figura 2.4.2: Modelo líder descendente [10]

La relación entre la carga total Q_T dentro del líder descendente y la magnitud de la corriente del rayo es [3]:

$$Q_T = (\frac{I}{25})^{0,7} \tag{2.4.1}$$

Donde Q_T es la carga total dentro del líder en [C], mientras que I es la corriente del rayo en [kA].

La carga en cada paso del líder (Q_i), viene dada por la siguiente expresión [31]:

$$Q_i = \frac{1}{\sum C_i} \cdot C_i \cdot Q_T \tag{2.4.2}$$

donde $C_i = ln(\frac{H_c}{h_i})$, con H_c es la altura de la nube y h_i es el promedio entre el punto mas bajo (h_{min}) y el punto mas alto (h_{max}) del paso del líder [31].

$$h_i = \frac{h_{min} + h_{max}}{2} \tag{2.4.3}$$

La carga dentro de la punta del líder viene dada por [31]:

$$Q_0 = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_0^2 \cdot E_c \tag{2.4.4}$$

donde ϵ es la constante dieléctrica del aire, E_c es el campo eléctrico critico para el rompimiento del aire y r_0[m] es el radio de la punta del líder, en este trabajo se considera como 3 [m].

Una vez estimada la carga del eléctrica del paso del rayo y la punta del líder descendente se procede a calcular la tensión inducida V_S en un punto S(x,y) como se muestra en la Img. 2.4.2, considerando las cargas imágenes para simular el efecto de la tierra, por medio, de la siguiente expresión [31]:

$$V_S = \frac{-2 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot (H_c - h_0)^2} \cdot \int_{h_0}^{H_c} (H_c - h) \cdot (\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) \cdot dh - \frac{Q_0}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot (\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}) \quad (2.4.5)$$

donde:

$$r_1 = \sqrt{(y-h)^2 + x^2} \quad (2.4.6)$$

$$r_2 = \sqrt{(y+h)^2 + x^2} \quad (2.4.7)$$

$$r_3 = \sqrt{(h_0-y)^2 + x^2} \quad (2.4.8)$$

$$r_4 = \sqrt{(h_0+y)^2 + x^2} \quad (2.4.9)$$

Para estimar el potencial V_B en la punta del líder descendente en el punto B se utiliza la Ec. 2.4.5 con las condiciones x=0 y y=$h_0 - r_0$ [31]:

$$\begin{aligned} V_B = \frac{-Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot (H_c - h_0)^2} \cdot [(H_c - h_0 + r_0) \cdot ln(\frac{H_c - h_0 - r_0}{r_0}) \\ - (H_c + h_0 - r_0) \cdot ln(\frac{H_c + h_0 - r_0}{2 \cdot h_0 - r_0})] - \frac{Q \cdot r_0}{12 \cdot \epsilon (H_c - h_0)} \cdot (\frac{1}{r_0} - \frac{1}{2 \cdot h_0 - r_0}) \end{aligned} \quad (2.4.10)$$

2.4.3. Criterio de inicio y propagación del líder ascendente

Este modelo [29] utiliza el criterio de voltaje inducido crítico necesario para el inicio de un líder ascendente estable, propuesto por Rizk para un conductor horizontal presentado en Ec. 2.2.3.

Por lo tanto, en el punto en que V_S sea superior a U_c, emergerá un líder ascendente con propagación estable.

2.4.4. Criterio de unión líderes

Se considera que si existe un campo eléctrico superior a 500 [kV/m] entre las puntas de los líderes, estos se conectaran y darán origen a una descarga eléctrica atmosférica. Cuando una descarga eléctrica atmosférica no impacta en la línea de transmisión, se considera que termina en tierra y se asume un campo eléctrico superior a 750 [kV/m] entre la punta del líder descendente y la tierra [32].

Una vez que se cumple con el criterio de inicio y propagación del líder ascendente, se traza una circunferencia en cada conductor de fase y cable de guarda, cuyo radio constante representa el gap típico (3-10 [m]) entre los líderes con el cual se satisface el criterio de unión, como se presenta en la Fig. 2.4.3.

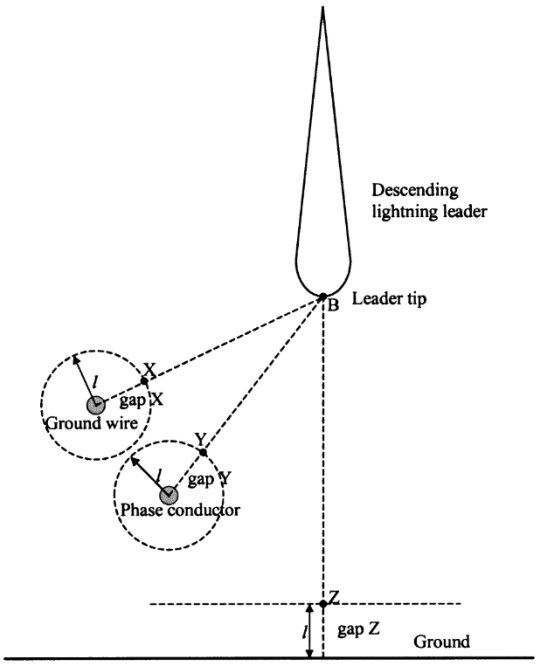

Figura 2.4.3: Evaluación de criterio de unión entre líderes [31].

El criterio de unión se evalúa por medio del campo eléctrico [kV/m] cuantificado por la siguiente expresión:

$$E_{SB} = \frac{V_S - VB}{D_{SB}} \tag{2.4.11}$$

donde D_{SB}[m] es la distancia entre el punto **S** y el punto **B** presentes en la Fig. 2.4.2.

2.4.5. Modelo de línea de transmisión

El sistema de transmisión considera la descripción en 3 dimensiones de los conductores de fase y cables de guarda, a lo largo de cada uno de los 3 tramos que conforman a la línea El Salto-Collahuasi.

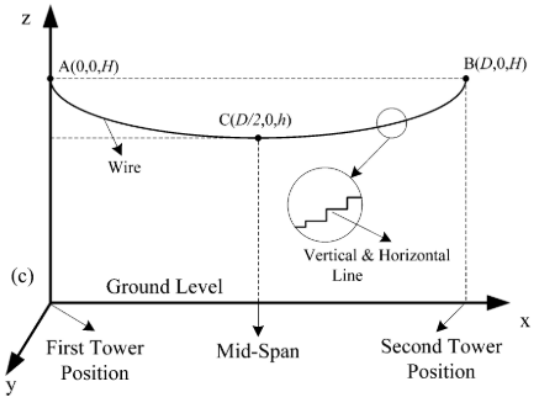

Figura 2.4.4: Modelo línea de transmisión en 3 dimensiones [29].

La catenaria entre dos torres se modelará por medio de lineas rectas horizontales y verticales, tal como se muestra en la Fig. 2.4.4. La siguiente relación muestra el trazado de los conductores de fase o cable de guarda en cada vano [29].

$$z = h \cdot \cosh\left(b \cdot \left(\frac{D}{2} - x\right)\right) \tag{2.4.12}$$

$$b = \frac{2}{D} \cdot ln\left|\frac{H - \sqrt{H^2 - h^2}}{h}\right| \tag{2.4.13}$$

donde:

- h [m] es la altura en la mitad del conductor de fase o cable de guarda dentro de un vano.
- H [m] es la altura del conductor de fase o cable de guarda en el punto de conexión de la torre de transmisión.
- D [m] es el vano entre torres.

Una vez modelado el sistema de transmisión, se obtiene una matriz con una cantidad de columnas equivalente a la cantidad de conductores de fase y cables de guarda, la cantidad de filas viene dada por el número de segmentos horizontales de cada vano que forman parte de los tramos de la línea de transmisión.

Durante el análisis de tensión inducida sobre los conductores y cables de guarda, se desprecia la tensión AC característica de la línea de transmisión, debido a que dicho voltaje posee una naturaleza periódica y no esta en el alcance de este trabajo.

2.4.6. Estimación tasa de fallas de apantallamiento

Para cada líder descendente trazado, se evaluará la carga eléctrica en cada paso, para todas las corrientes pertenecientes al rango de 2[kA]-200[kA].

Una vez obtenida la matriz que representa el sistema de transmisión y la carga eléctrica de cada paso para un corriente determinada, se evalúa en cada paso del líder descendente el cumplimiento del criterio de inicio y propagación del líder ascendente en todos los puntos de la matriz antes mencionada.

Cuando se localicen los puntos donde se inicia un líder ascendente continuo, se traza un gap característico en dichos puntos, se procede a evaluar el cumplimiento del criterio de unión entre líderes y se determina si el rayo impactará un conductor de fase, cable de guarda o la tierra para cada paso del líder descendente.

Finalmente cuando se termine de evaluar todos los puntos de la matriz, el proceso se repite aumentando la corriente. Con lo anterior se encuentra el rango de corriente $[I_{Min}, I_{Max}]$ para el cual se genera un impacto del rayo a los conductores de fase de la línea de transmisión (SFR) y se puede cuantificar por medio de la siguiente expresión [10] [29]:

$$SFR = 0{,}1 \cdot T_d \cdot d \cdot \int_{I_{Min}}^{I_{Max}} P(I) \cdot dI \tag{2.4.14}$$

- d es el ancho de captación de rayos en [m].
- Td número de días de tormenta eléctrica al año.
- I es la corriente característica del rayo en [kA].

La estimación de la tasa de falla por flameo fue adaptada a partir de los modelos [10] [29].

Como se ha mencionada anteriormente, no todos los rayos que impacten a la línea de transmisión generan una falla del aislamiento, por lo tanto, se requiere del parámetro de SFFOR, el cual, se presenta en la siguiente expresión:

$$SFFOR = 0{,}1 \cdot T_d \cdot d \cdot \int_{I_{cr}}^{I_{Max}} P(I) \cdot dI \tag{2.4.15}$$

I_{cr} [kA] es la corriente de rayo que impacta a la línea de transmisión, que supera el valor de la corriente crítica de flameo Ec. 2.3.24.

P(I) [-] corresponde a la densidad de probabilidad de la corriente del rayo, se puede obtener mediante la siguiente expresión [29]:

$$P(I) = e^{0,05-I/74} \tag{2.4.16}$$

En la actualidad los modelos de estimación de tasa de falla de apantallamiento basados en MLP [10] [31], determinan que un estado de apantallamiento es adecuado cuando los valores de SFFOR no superan los 0.05 [rayo/año]. [5].

Capítulo 3

Aplicación de los modelos seleccionados

3.1. Antecedentes línea alta tensión Lagunas-Collahuasi

En el presente capítulo se indican los parámetros eléctricos de la línea 220 [kV] Lagunas-Collahuasi en conjunto con los antecedentes utilizados para la aplicación de los modelos de apantallamiento [7] [14].

La línea de transmisión Lagunas-Collahuasi se divide en 3 tramos según su altura con respecto al nivel del mar, los cuales son: altura baja, altura media y altura alta. Las secciones de altura baja y media presentan estructuras de doble circuito con un cable de guarda, mientras que el tramo de altura alta esta compuesto por un circuito simple con dos cables de guarda. En la Fig. 3.1.1 se presenta un diagrama esquemático de la línea de transmisión y en la Fig. 3.1.2 se presenta la disposición de la línea en el terreno.

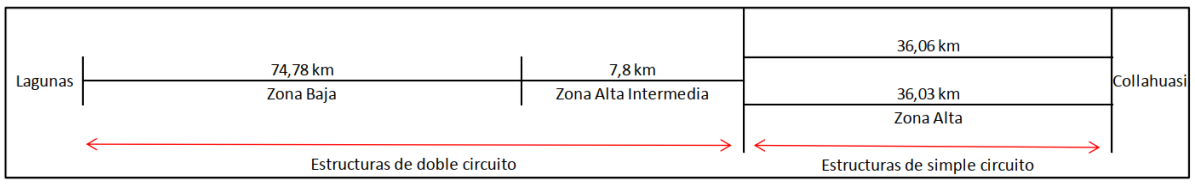

Figura 3.1.1: Diagrama esquemático de la línea [7].

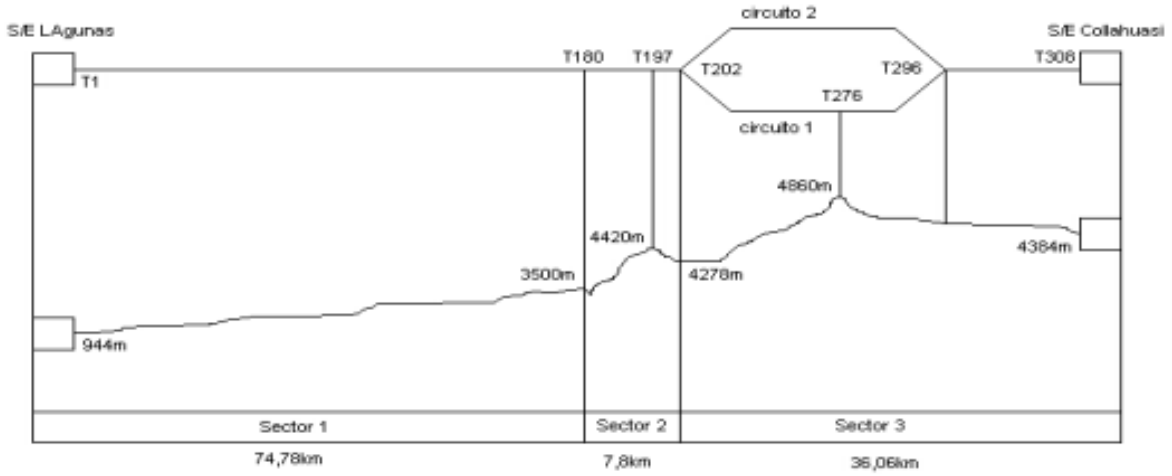

Figura 3.1.2: Disposición del circuito en el terreno [14].

El cable de guarda utilizado se presenta en la Tabla 3.1.1:

Tipo de cable de guardia	ALUMOWELD 8AWG
Diámetro [mm]	9.78
Resistencia 20 [C^o] [Ω/km]	1.463

Tabla 3.1.1: Datos cable de guardia de la línea de transmisión 2x220 kV Lagunas-Collahuasi.

Los datos de los conductores de la línea de transmisión se presentan en la Tabla 3.1.2:

Parámetros	Altura baja	Altura media	Altura alta
Tipo	AASC FLINT	ACSR BLUEJAY	ACSR BLUEJAY
Diametro	25.16 [mm]	31.98 [mm]	31.98 [mm]
Resistencia	0.0924 [Ω/km]	0.0544 [Ω/km]	0.0544 [Ω/km]

Tabla 3.1.2: Datos técnicos de lso conductores de la línea de transmisión 2x220 kV Lagunas-Collahuasi.

De acuerdo con las geometría de la torre de transmisión y el largo de la cadena de suspensión de cada tramo [7], las coordenadas utilizadas para este estudio se presentan en la Tabla 3.1.3

Zona	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	XG	YG
Baja	2.80	3.28	2.80	15.77	19.77	23.77	0	28.82
	-2.80	-3.28	-2.80	23.77	19.77	15.77	-	-
Media	4.58	5.12	4.12	19.31	24.81	30.31	0	37.33
	-4.12	-5.12	-4.58	30.31	24.81	19.31	-	-
Alta	4.32	4.82	-4.82	25.81	19.46	19.46	3.22	31.28
	-	-	-	-	-	-	-3.22	31.28

Tabla 3.1.3: Coordenadas de conductores de fase y cables de guarda [m]

- X1 corresponde a la coordenada abscisa de la fase 1.
- X2 corresponde a la coordenada abscisa de la fase 2.
- X3 corresponde a la coordenada abscisa de la fase 3.
- XG corresponde a la coordenada abscisa del cable de guardia.
- Y1 corresponde a la coordenada ordenada de la fase 1.
- Y2 corresponde a la coordenada ordenada de la fase 2.
- Y3 corresponde a la coordenada ordenada de la fase 3.
- YG corresponde a la coordenada ordenada del cable de guardia.

La cadena de aisladores se compone por aisladores tipo discos de vidrio de 146x254 [mm]. Para las especificaciones técnicas de la cadena de aisladores, se considera el voltaje crítico de ruptura ante impulsos de polaridad negativa, debido a que en este estudio se analizarán descarga eléctricas atmosféricas de polaridad negativa. En la Tabla 3.1.4 se presentan las características de la cadena de aisladores para cada sección de la línea de transmisión en estudio.

Zona	Número de discos	Voltaje crítico de aisladores para impulso negativo
Zona de altura baja	15	1225 [V]
Zona de altura media	15	1225[V]
Zona de altura alta	18	1455[V]

Tabla 3.1.4: Tensión de ruptura ante impulso negativo para cadena de aisladores

Las disposiciones geométricas de las lineas de transmisión mas representativas para el tramo de altura baja, altura media y altura alta, se presentan en las Fig. 3.1.3, Fig. 3.1.4 y Fig. 3.1.5 respectivamente.

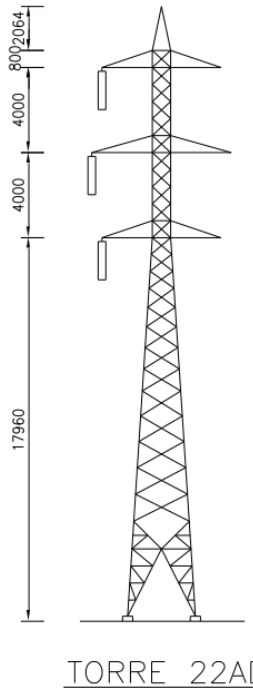

Figura 3.1.3: Geometría torre mas representativa de la zona de altura baja [7].

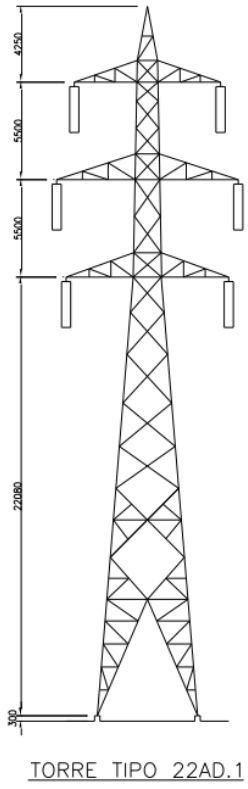

Figura 3.1.4: Geometría torre mas representativa de la zona de altura media [7].

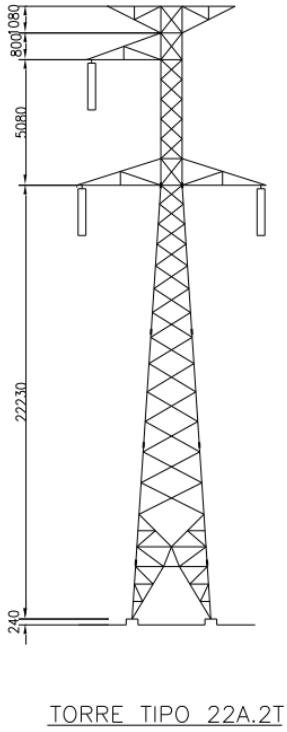

Figura 3.1.5: Geometría torre mas representativa de la zona de altura alta [7].

3.2. Estimación Densidad de rayos

Los días de tormenta al año en la ubicación de la línea de transmisión en estudio es de 1.1[días de tormenta/año] de acuerdo con [22].

3.3. Aplicación del modelo Electro-geométrico

3.3.1. Consideraciones generales

- El MEG se aplicará sobre las torres mas representativas de cada tramo de la línea de transmisión.
- El MEG aplicado considera que las torres están sobre un terreno plano.
- Los parámetros de entrada del MEG para el cálculo de las distancias críticas son A=10 y B=0.65.
- Se considera que la probabilidad de que un rayo impacte a una estructura o caiga sobre el terreno es la misma, por lo tanto, el parámetro γ=1.

- Para las estructuras de doble circuito, se aplicará el MEG a un solo circuito y se multiplicará por dos el resultado de las tasas de fallas de apantallamiento y la tasa de flameo por fallas de apantallamiento.

- Para el cálculo de la corriente máxima de apantallamiento en la torre tipo 22AD y 22AD.1 , se considera el solapamiento entre los arcos expuestos de los conductores de fases, por lo cual, el ancho expuesto se estimará como la suma de los anchos expuestos de la fase de mayor altura y la fase central. Una vez que el arco expuesto de la fase 3 permita un apantallamiento completo de la fase 2, el arco expuesto total vendrá dado solo por el arco expuesto de la fase 3.

- En el caso de la torre tipo 22AD y 22AD.1, la fase 1 siempre estará apantallada por los conductores de las fases 3 y 2, por lo cual, no se considera en la aplicación del MEG.

- El GFD es obtenido a partir de los días de tormentas y la Ec. 2.3.35, considerando T_d=1.1[días de tormenta/año].

- La corriente mínima considerada es de 2 [kA].

- La corriente máxima considerada es de 200 [kA].

- Para la obtención de la corriente crítica se considera el valor de la tensión de ruptura de la cadena de aislación, impedancia del conductor y la Ec. 2.3.24

- La estimación de la tasa de falla de apantallamiento y para la tasa de flameo por fallas de apantallamiento, se requiere evaluar un rango de corriente que permite encontrar la cantidad de rayos que impactan a los conductores de fase y cuantos de estos rayos provocan flameo directo de aisladores.

3.3.2. Descripción del modelo

Para la aplicación del modelo se requiere como entradas la información de la impedancia del conductor de fase, V_{crit} para el calculo de I_{crit}, el valor de T_d, geometría de la torre de transmisión mas representativa y largo del tramo.

Otro parámetro de entrada es la corriente máxima de apantallamiento, cuya obtención se detalla a continuación.:

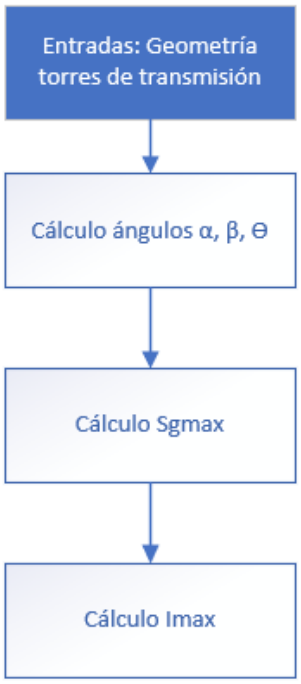

Figura 3.3.1: Cálculo I_{max}.

Una vez obtenidos todos los parámetros de entrada del MEG, se utiliza el procedimiento que se resume de la siguiente manera:

a) Se comienza la simulación estableciendo un rango de corrientes comprendido por la corriente del rayo de I=2[kA] y la corriente I_{max}[kA]. Para cada corriente se siguen los siguientes pasos.

b) Para la corriente del rayo determinada en el punto anterior, se procede a calcular el arco expuesto S[m], por medio de la Ec. 2.3.4. Además se calcula la densidad de probabilidad de la corriente $f_1(I)$, con la Ec. 2.3.32.

c) A partir de los resultados obtenidos en el punto anterior, se calcula las distancias laterales atractivas R_{EGM} y R_{EGM2} [m], a través de las Ec. 2.3.10 y Ec. 2.3.11 respectivamente.

d) Se procede a calcular el ancho expuesto de apantallamiento W_u y el ancho de apantallamiento W_o, a través de las Ec. 2.3.7 y Ec. 2.3.6 respectivamente.

e) Se evalua si se completo el rango de corrientes establecido en el punto a), si se completaron los cálculos para cada corriente, se procede a calcular SFR con la Ec. 2.3.29 y SFFOR con la Ec. 2.3.31.

3.3.3. Diagrama de flujo para aplicación del MEG

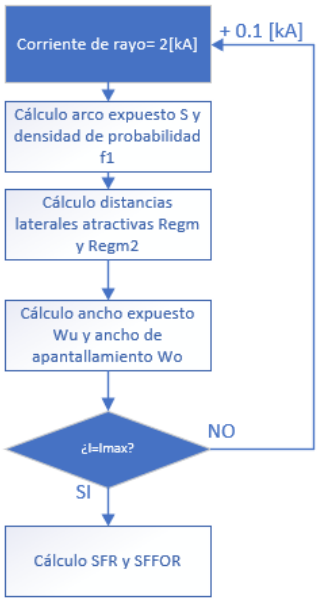

Figura 3.3.2: Aplicación MEG.

3.4. Aplicación del modelo del líder progresivo

3.4.1. Simulación líder descendente

- Para la simulación del líder descendente se considera que la nube de tormenta se encuentra a 4000 [m] de altura.
- La tortuosidad del líder descendente se genera aleatoriamente, por medio, de coordenadas esféricas que describen el largo del paso ρ, el cambio de dirección con respecto al eje vertical ϕ y el ángulo θ que representa la proyección del rayo en el plano XY.
- Se considera que el largo del paso del líder posee una distribución uniforme que varia entre 10 y 100 [m].
- El cambio de dirección ϕ posee una distribución Gaussiana con media de 17^o.
- Para el ángulo θ se considera una distribución uniforme que va de 0^o a 360^o.

- Para la representación en 3 dimensiones del líder descendente se considera un cambio de variable de coordenadas esféricas a coordenadas cartesianas.

- El área sobre la cual se genera el líder descendente, corresponde a una extensión de largo equivalente al largo del tramo de la línea de transmisión, con un ancho de 8000 [m] equivalente al diámetro de la nube de tormenta.

3.4.2. Consideraciones línea de transmisión

- Se deben construir las matrices de transmisión **x** y **z**, por medio de las ecuaciones 2.4.12 y 2.4.13.

- La matriz de transmisión **x** posee la descripción de la catenaria de cada fase y cable de guarda en el eje x, mientras que la matriz **z** posee la descripción de la catenaria en el eje z. El número de columnas de la matriz es equivalente a la cantidad de fases y cable de guarda de la línea de transmisión en estudio. Para los tramo de doble circuito poseen 7 columnas, mientras que para el tramo de simple circuito corresponde a 5 columnas.

- Se desprecia la tensión AC característica de la línea, para la estimación del voltaje inducido en la línea de transmisión.

- Se considera que las torres de transmisión están en un terreno plano.

3.4.3. Consideraciones tasa de falla de apantallamiento

- No existe un indicador de SFFOR basado en el MLP, por lo cual en este estudio se utiliza el valor recomendado por IEEE para determinar si el estado de apantallamiento es adecuado. Si el valor de SFFOR es inferior a 0.05, se considera que el apantallamiento es adecuado.

- Para la estimación de la tasa de falla de apantallamiento y la tasa de flameo por fallas de apantallamiento, se determinará el rango de corriente [2-200 kA].Para la estimación de tasa de falla de apantallamiento se utilizará la Ec.2.4.14, mientras que para la tasa de flameo por fallas de apantallamiento se utilizará la Ec. 2.4.15.

- Cuando no existe unión entre líderes, se considera un SFR=SFFOR=0.

- Se considera un ancho de captación de rayos igual al largo del segmento horizontal que describe al conductor de fase y cable de guarda, A_d=5[m].

- El GFD es obtenido a partir de los días de tormentas y la Ec. 2.3.35, considerando

T_d=1.1[días de tormenta/año].

3.4.4. Descripción del modelo

Los parámetros de entrada del modelo, corresponden a las matrices de transmisión **x** y **z**, geometría de la torre de transmisión, radio de conductor, T_d, ancho de captación de rayos A_d y I_{crit}.

El procedimiento de aplicación del LPM para la estimación de fallas de apantallamiento se presenta a continuación:

a) Se genera un líder descendente de manera aleatoria.

b) Se inicia la simulación con una corriente de rayo de 2[kA].

c) Se comienza el análisis con el primer paso del líder descendente.

d) Calculo de Q_T, Q_i y Q_0 mediante las ecuaciones 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.4 respectivamente.

e) Una vez obtenido el valor de Q_0, se procede a calcular V_B (Ec. 2.4.10) en el punto mas bajo del paso del líder en estudio.

f) Se calcula la tensión inducida V_S en el punto S(i,j) de la matriz de transmisión.

g) Se evalúa si la tensión inducida V_S es superior a la tensión crítica V_c, al cumplirse esta condición se establece el inicio de un líder ascendente positivo estable desde el punto S. En el caso de no cumplirse la condición para el inicio de un líder estable, se debe evaluar si la coordenada j es igual al número de columnas de la matriz de transmisión, si no se cumple lo anterior se debe evaluar la condición de inicio de líder estable en el punto S(i,j+1), mientras que si j es igual al número de columnas de la matriz de transmisión se debe evaluar la condición de inicio de líder estable en el punto S(i+1,j).

h) Una vez iniciado un líder ascendente estable, se traza un gap de 10[m] vertical en el punto S.

i) Cuando se traza el gap, se debe evaluar si existe unión de líderes y se cumple que $(V_S - V_B)$/(distancia entre puntas) es superior a 500 [kV/m].En caso de que no se cumpla la condición de unión, se repetirá el proceso en el siguiente paso del líder descendente, en el caso de que ya se completo el trazado del líder hacia tierra, y la corriente es inferior a 200 [kA], se repetirá el proceso aumentando en 1 [kA] el valor de la corriente del rayo. Si ya se completó el trazado del líder descendente y se evaluaron todos los valores de corriente de

rayo, se determina que el rayo impacta a tierra, se establece SFR=SFFOR=0.

j) Una vez completado el proceso de unión de líderes, se calcula SFR y SFFOR, mediante las Ec. 2.4.14 y 2.4.15 respectivamente.

k) El proceso se repite 500 veces para obtener valores promedios de SFR y SFFOR representativo. Se escoge un muestra de 500 en coherencia con el trabajo de Vargas [32] donde se observaron 500 rayos para determinar un modelo aleatorio para el trazado del líder descendente.

3.4.5. Diagrama de flujo para aplicación del MLP en estimación de fallas de apantallamiento

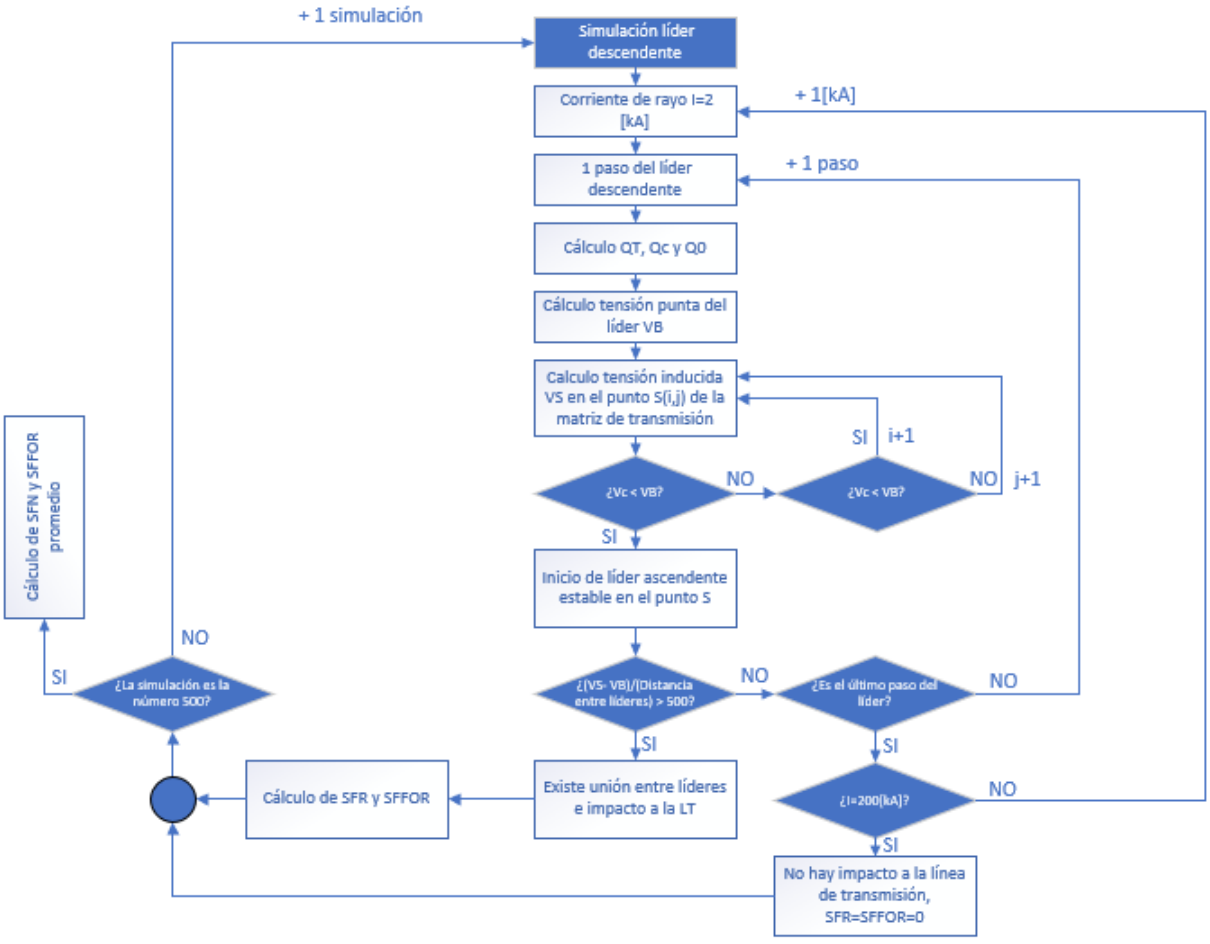

Figura 3.4.1: Aplicación MLP para estimación de fallas de apantallamiento.

Capítulo 4

Análisis y resultados

En este capitulo se presentan los resultados obtenidos en el estudio de estado de apantallamiento según el MEG y MLP, además se entrega la comparación entre ambos modelos.

4.1. Resultados aplicación del MEG

En la Tabla 4.1.1 se presentan los parámetros relevantes obtenidos al aplicar el MEG para la evaluación del estado de apantallamiento, para cada tramo que forma parte de la línea de transmisión

Parámetros	Tramo altura baja	Tramo altura media	Tramo altura alta
Ángulo de apantallamiento	29	30.4	11.4
I_{crit} [kA]	4.96	5.9	4.91
I_{max} [kA]	12.25	19.25	7.03
$SFR_{Estandar} * 10^{-4}$	2.37	12	0.05 [rayo/año]3
SFFOR$*10^{-4}$	1.93	11	0.04

Tabla 4.1.1: Resultados MEG

4.1.1. Ángulo de apantallamiento

La recomendación para la construcción de líneas de transmisión, era considerar un ángulo menor a 45^o, pero a partir del año 2010 de acuerdo con la norma IEEE 1410-2010[15], se recomienda que las nuevas construcciones de líneas de transmisión consideren un ángulo de apantallamiento menor a 30^o.

A partir de los resultados del ángulo de apantallamiento, se puede apreciar que el ángulo de apantallamiento de las líneas de transmisión sigue la recomendación de la norma, los tramos de altura baja y media poseen un ángulo cercano a 30^o, a pesar de que la construcción de la línea fue realizado anterior al año 2010. Para el tramo de altura alta se obtuvo un valor de 11.4^o, debido a la geometría de la torre de transmisión de este tramo y la presencia de 2 cables de guarda se debe señalar que se considera como ángulo de apantallamiento, al ángulo que existe entre el cable de guarda y la fase más alta de la línea de transmisión, tal como se muestra en la Fig. 4.1.1.

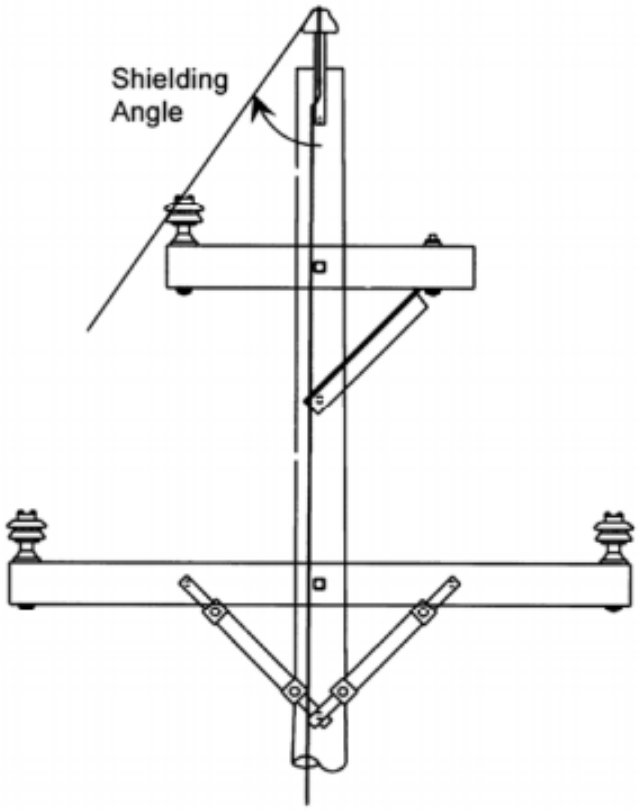

Figura 4.1.1: ángulo de apantallamiento [5].

Si se considerase el ángulo de apantallamiento, como el ángulo que existe entre el cable de guarda y el conductor de la fase más baja, se obtendría un valor más alto, al comparar con el ángulo establecido en la norma. Mientras menor sea el ángulo de apantallamiento, mejor será la protección de la línea ante DEAT.

4.1.2. Corriente crítica de flameo de aisladores

Al superar el valor de la corriente crítica, se produciría un flameo de aisladores, la norma [15] recomienda que las líneas de transmisión deben ser diseñadas considerando una corriente crítica de 5[kA]. Notamos al observar los resultados que la corriente crítica de flameo de aisladores es cercana al valor recomendado, en los casos de los tramos de altura baja y altura alta, mientras que para el tramo de altura media se considera un valor superior al recomendado, lo cual otorga un soporte mayor ante flameo de aisladores por impacto de DEAT a la línea de transmisión.

4.1.3. Corriente máxima de apantallamiento

Es importante resaltar que esta corriente depende solo de la geometría de la torre de transmisión, por encima de este valor de corriente todas las DEAT que estén sobre la línea de transmisión deberían terminar en el cable de guarda . Con los resultados obtenidos de corrientes máximás y corrientes críticas, se puede encontrar el rango de corrientes para la cual puede existir un impacto de rayos a la línea de transmisión que generen flameo de aisladores. El rango para el tramo de altura baja es 4.96-12.25 [kA], para el tramo de altura media es 5.9-19.25 [kA], y el tramo de altura alta tiene un rango de 4.91-7.03 [kA].

Solo basados en la geometría de las torres de transmisión y en las características de los aisladores, conductores y cables de guarda de la línea de transmisión, se puede decir que el tramo de altura alta, al poseer un rango de corrientes de falla menor en comparación a los otros dos tramos, presenta un mayor grado de apantallamiento ante DEAT. El caso contrario es del tramo de altura media, que posee un rango de corrientes de falla más grande, por lo cual se podría decir que posee un menor grado de apantallamiento en comparación con el resto de los tramos.

A pesar de que el análisis realizado hasta este punto, permite obtener algunas conclusiones, es necesario considerar las probabilidades de que la corriente tome los valores del rango de corrientes. Por lo anterior toma importancia el analizar los valores de SFR total y SFFOR de cada tramo.

4.1.4. SFR Total

Este parámetro indica cuantos rayos impactan a la línea de transmisión en un año sin determinar si la línea presenta flameo de aisladores. Es importante señalar que ningún tramo se extiende 100 km, por lo cual el valor de SFR presente en la Tabla 4.1.1, es un valor que se encuentra escalado, por un factor que equivale a la proporción del largo del tramo con respecto a 100 [km] de línea de transmisión. Notamos que la cantidad de rayos que cae a la línea de transmisión es mayor en el tramo de altura media, seguido por el tramo de altura baja y el tramo de altura alta es el que posee una menor cantidad de captación de rayos. Lo anterior es coherente con el análisis realizado basado solo en la geometría y características de la línea.

Los valores obtenidos de SFR total para cada tramo, indican que en un año el número de impacto de rayos a la línea de transmisión se pueden aproximar a 0.

Para poder determinar si el estado de apantallamiento es correcto bajo los estándares de la norma [15], se debe analizar el SFFOR.

4.1.5. SFFOR

Este parámetro indica cuantos rayos impactan a la línea de transmisión en un año y generan una flameo de los aisladores. Al inspeccionar los resultados presentes en la Tabla 4.1.1, se aprecia nuevamente que el apantallamiento del tramo de altura alta es superior al de los otros dos tramos, debido a que presente el menor valor de SFFOR.

Los bajos valores de SFFOR se deben a que el rango de corrientes de falla determinados para cada tramo, son valores de corriente de rayo que cuentan con una baja probabilidad de ocurrencia. Además estos bajos valores se pueden aproximar a cero, por lo cual no existirán rayos que impacten a la línea de transmisión y generen flameo de aisladores bajo el modelo del MEG.

Otro aspecto que se puede señalar es que el tramo de altura alta posee un mayor grado de apantallamiento en comparación con los otros dos tramos, porque la torre más representativa de este tramo posee dos cables de guarda.

A continuación se presentan algunas relaciones relevantes dentro del MEG.

4.1.6. Corriente de rayo v/s Ancho expuesto

En las Fig.4.1.2 y Fig. 4.1.3 se presenta la relación entre la corriente del rayo perteneciente al rango de corrientes que generan una falla en el apantallamiento de la línea y el ancho expuesto. Se consideran los tramos de altura baja y altura alta para visualizar la relación

anteriormente mencionada.

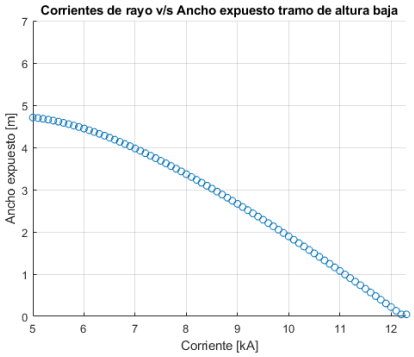

Figura 4.1.2: Corriente de rayo v/s Ancho expuesto tramo altura baja .

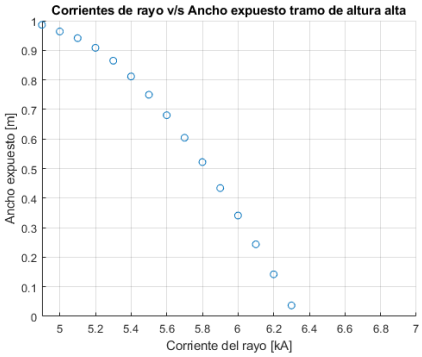

Figura 4.1.3: Corriente de rayo v/s Ancho expuesto tramo altura alta.

Tanto en la Fig. 4.1.2 como en la Fig. 4.1.3 se presentan los valores del ancho expuesto para el rango de corriente determinado por la corriente crítica I_{crit} y la corriente máxima de apantallamiento I_{max}. En ambos casos se puede observar que el ancho expuesto disminuye a medida que el valor de la corriente incrementa, cuando la corriente de rayo alcanza el valor máximo de apantallamiento, el ancho expuesto toma el valor de 0, es decir, en este punto ningún rayo puede impactar a los conductores de fase de la línea de transmisión.

Al comparar los resultados de ambos tramos, se evidencia que los anchos expuestos del tramo de altura baja son superiores a los del tramo de altura alta, esto se debe en gran medida a que la geometría de las torres es diferente, presentan distinto ángulo de apantallamiento y los tramos poseen largos diferentes, siendo el tramo de altura baja más largo que el tramo de altura alta.

4.1.7. SFR específico v/s Corriente de rayo

Las Fig. 4.1.4 Y Fig. 4.1.5 muestran los resultados del calculo de SFR a partir de una corriente especifica, abarcando todo el rango de corrientes comprendido por I_{crit} y I_{max}.

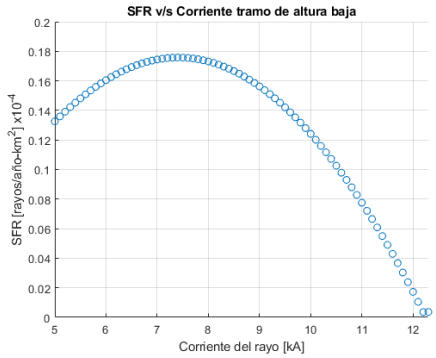

Figura 4.1.4: SFR v/s Corriente de rayo tramo altura baja.

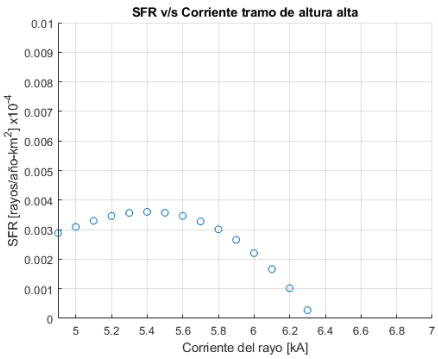

Figura 4.1.5: SFR v/s Corriente de rayo tramo altura alta.

De las gráficas 4.1.4 y 4.1.5, se distingue que para el valor mínimo del rango de corrientes no se obtiene el máximo valor de SFR. Esto se explica debido a que el SFR es un parámetro que depende de la probabilidad que la corriente del rayo tome cierto valor, en este caso dentro del rango de corrientes en estudio, existen corrientes con mayor probabilidad de ocurrencia que la corriente crítica I_{crit}. La relación entre el SFR específico y corriente de rayo sigue mostrando que para la corriente máxima de apantallamiento no deben existir impactos a la línea y el SFR es igual a 0.

La diferencia entre ambas gráficas, se debe a las diferencias entre los largos de los tramos y la geometría de las torres más representativas.

4.1.8. SFR específico v/s Ancho expuesto

En las Fig. 4.1.6 y Fig. 4.1.7 se presenta la relación entre el SFR específico y el ancho expuesto para el rango de corriente en estudio.

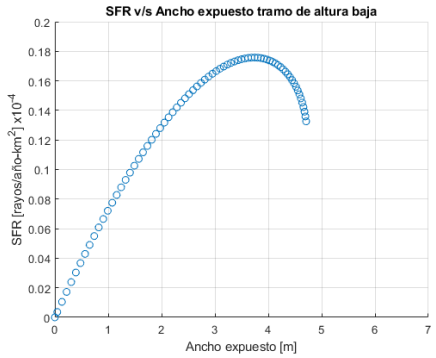

Figura 4.1.6: SFR v/s Ancho expuesto tramo altura baja .

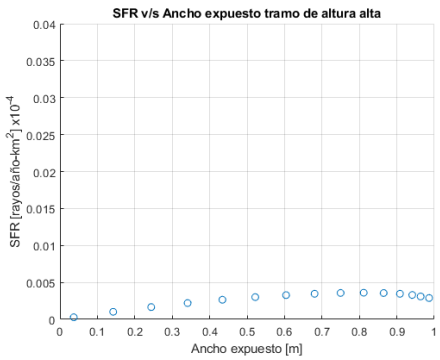

Figura 4.1.7: SFR v/s Ancho expuesto tramo altura alta.

De la Ec. 2.3.27 se concluye que la relación entre el SFR y el ancho expuesto, viene dado por la densidad de probabilidad de la corriente de rayo, amplificada por un factor constante (GFD·L). Los resultados obtenidos en las gráficas 4.1.6 y 4.1.7 muestran la relación descrita a partir de la Ec. 2.3.27. Nuevamente la diferencia entre las gráficas de los tramos de altura baja y altura alta se atribuye a la diferencia en los largos de los tramos y su geometría, dado que el GFD es igual para ambos tramos, ya que se encuentran ubicado en la misma zona geográfica.

4.2. Resultados aplicación del MLP para estimar tasa de falla de apantallamiento

A continuación se presentan los resultados de la simulación del MLP y los resultados obtenidos cuando este modelo es utilizado para estimar la tasa de falla de apantallamiento de la línea de transmisión Lagunas-Collahuasi.

4.2.1. Simulación líder descendente

Como se indica en la Fig. 4.2.1 el modelo requiere como entrada la simulación de un líder descendente, para ello se replica el MLP estocástico en 3 dimensiones desarrollado en [32].

El resultado del MLP simulado se puede observar en la Fig. 4.2.1 en ella se puede apreciar claramente la tortuosidad del líder descendente.

En las figuras 4.2.2 y 4.2.3, se presenta el desarrollo del MLP en dos dimensiones visto desde los ejes XZ e YZ respectivamente.

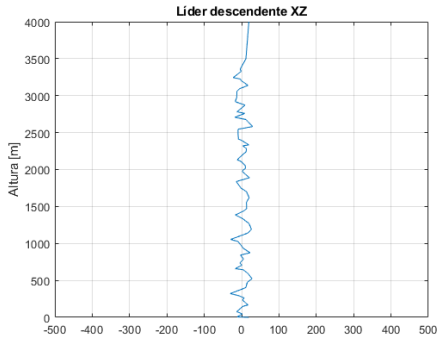

Figura 4.2.2: Modelo líder descendente en plano XZ.

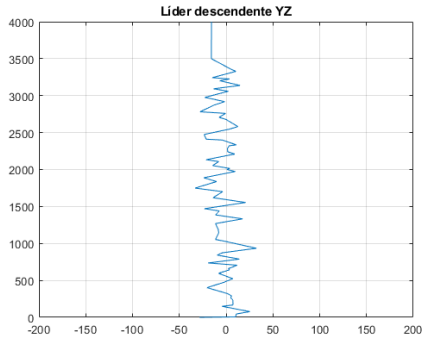

Figura 4.2.3: Modelo líder descendente en plano YZ.

Como se mencionó en la descripción del modelo en el Cap. 3, el punto inicio del líder

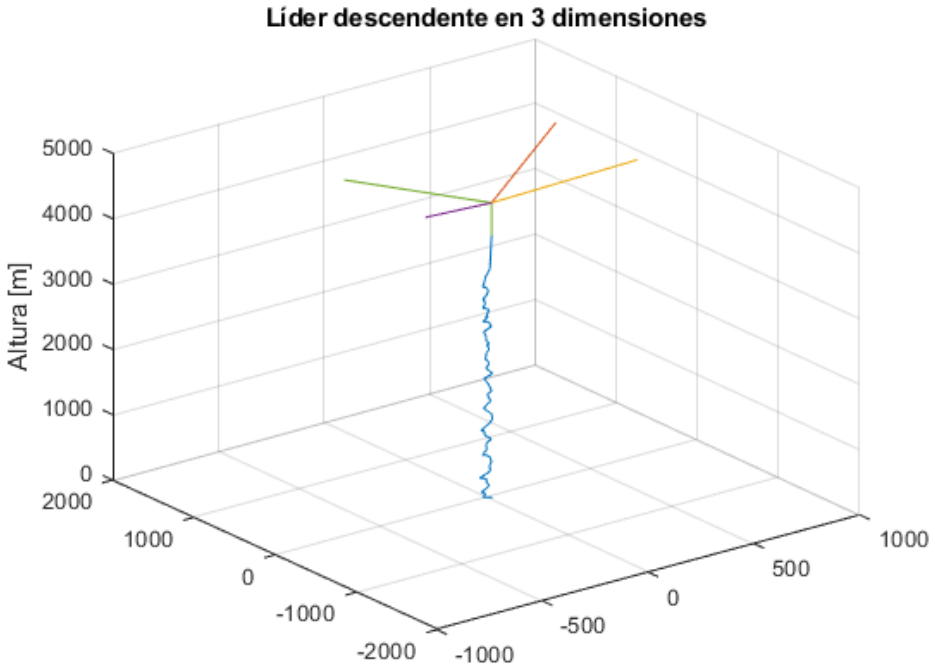

Figura 4.2.1: Modelo líder descendente en 3 dimensiones.

descendente variará aleatoriamente cada vez que se realice una simulación, lo anterior se puede observar en la Fig. 4.2.4, donde se presenta el punto de inicio de 500 simulaciones en un área especifica.

Al igual que el punto de inicio del líder descendente, el punto final también posee aleatoriedad, en la Fig. 4.2.5 se presentan los puntos finales de 500 simulaciones. Es importante señalar que el punto final cambiará cuando el líder descendente se conecte con un líder ascendente iniciado en un punto S, siendo estas coordenadas el nuevo punto final. El punto S siempre estará sobre la línea de transmisión.

El área sobre la cual el líder negativo desciende dependerá del tramo de estudio.

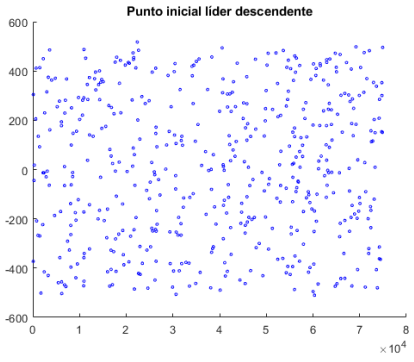

Figura 4.2.4: Puntos de inicio aleatorios.

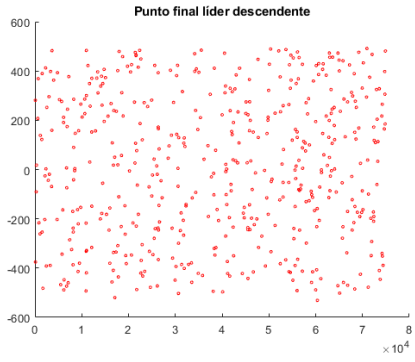

Figura 4.2.5: Puntos finales aleatorios.

4.2.2. Corrientes de rayo.

A continuación se presentan la cantidad y la magnitud de la corriente [kA] de los rayos que impactan a la línea de transmisión, para los 3 tramos en estudio.

Tramo	Altura baja		Altura media		Altura alta	
Número de impacto	I_{Min}	I_{Max}	I_{Min}	I_{Max}	I_{Min}	I_{Max}
1	43	200	57	200	81	200
2	22	200	31	200	136	200
3	72	200	68	200	108	200
4	188	200	20	200	171	200
5	41	200	140	200	177	200
6	135	200	16	200	165	200
7	69	200	15	200	123	200
8	133	200	133	200	93	200
9	138	200	31	200	180	200
10	153	200	137	200	147	200
11	-	-	38	200	33	200
12	-	-	68	200	40	200
13	-	-	164	200	164	200
14	-	-	108	200	7	200

Tabla 4.2.1: Corrientes de rayo para impactos en la línea de transmisión

De la Tabla 4.2.1, se aprecia que las corrientes mínimás más bajas de los rayos, que impactan los tramos de altura baja, altura media y altura alta, son respectivamente 22[kA], 20[kA] y 7[kA]. Notamos que todas las corrientes mínimás de los tramos son superior a las corrientes críticas de cada tramo presentadas en Tabla 4.1.1. Esto indica que cualquier rayo que impacte a la línea de transmisión generará flameo de aisladores.

Notamos que la corriente máxima que puede impactar a la línea es de 200 [kA] en los tres tramos.

De acuerdo con los resultados, existe un 2 % de que de una muestra de 500 rayos, se genere un impacto a la línea de transmisión en el tramo de altura baja, mientras que para los tramos de altura media y baja, esta probabilidad es de un 2.8 %.

Considerando el trazado total de la línea de transmisión, se considera que existen 38 rayos que impactan a la línea y generarán flameo de aisladores de un total de 500 rayos simulados.

4.2.3. Fase de impacto

En las tablas 4.2.2 y 4.2.3 se presentan las fases en las cuales impactan los rayos a la línea de transmisión, para los tramos de altura baja-media y altura alta respectivamente.

Fases	Tramo altura baja	Tramo altura media
X3	3	6
X2	2	2
X1	0	0
X3’	0	0
X2’	1	2
X1’	4	4

Tabla 4.2.2: Impactos de rayos a las fases de la LT, tramos altura baja y media.

Fases	Tramo de altura alta
X1	1
X2	5
X3	8

Tabla 4.2.3: Impactos de rayos a las fases de la LT, tramo altura alta.

En el caso de los tramos de altura media y altura baja, todos los impactos a la línea de transmisión, ocurren en las fases 3 y 2 para el circuito uno, y en las fases 1’ y 2’ en el circuito dos. La posición del impacto de los rayos en las torres de transmisión, ocurre en las fases de mayor altura y en ningún caso hubo impacto en la fase más cercana a tierra.

Para el tramo de altura alta, se aprecia que el impacto de los rayos ocurren en las fases exteriores de la torre de transmisión, mientras que la fase de mayor altura fue impactada solo por un rayo.

4.2.4. Tensión inducida.

En la Fig. 4.2.6 se presenta la tensión inducida para el tramo de altura baja, en ella podemos ver que la tensión inducida es siempre positiva. La polaridad positiva se debe a que el líder descendente negativo que presenta una tensión negativa inducirá una tensión del signo opuesto sobre las estructuras presentes en tierra. El valor de la tensión inducida no se ve afectada por la tensión de operación de la línea de transmisión, debido a que no se considera en el modelo en estudio.

Es importante señalar que la gráfica de la tensión inducida variará de acuerdo con la cercanía del rayo a la torre de transmisión. En el caso de la Fig. 4.2.6, se puede decir que el rayo cae en la cercanía del kilometro 50 del trazado del tramo, por lo cual el voltaje inducido es mayor en este sector.

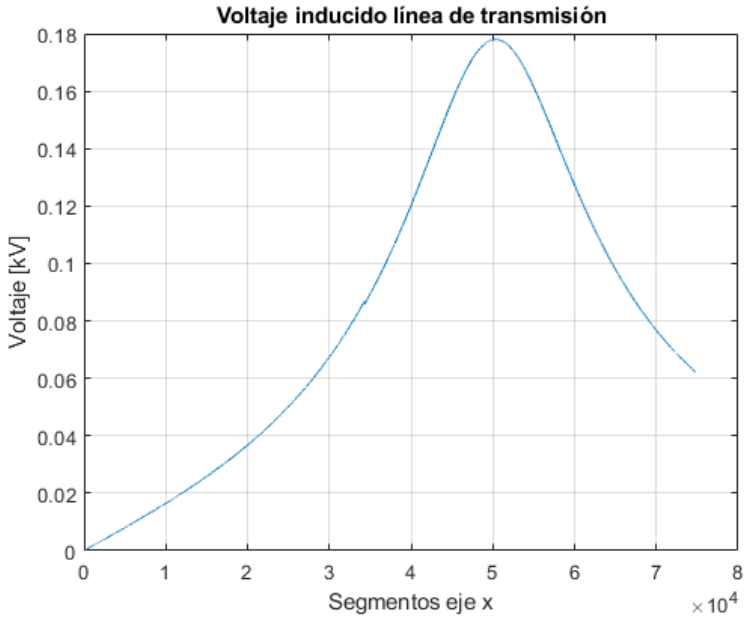

Figura 4.2.6: Voltaje inducida en la línea de transmisión.

4.2.5. Tensión de la punta del líder descendente.

En la Fig. 4.2.7 se puede observar la naturaleza negativa de la tensión en la punta del líder descendente, la cual va incrementando paso a paso debido a la acumulación de carga, es decir, a medida que el líder desciende la tensión en su punta va incrementando.

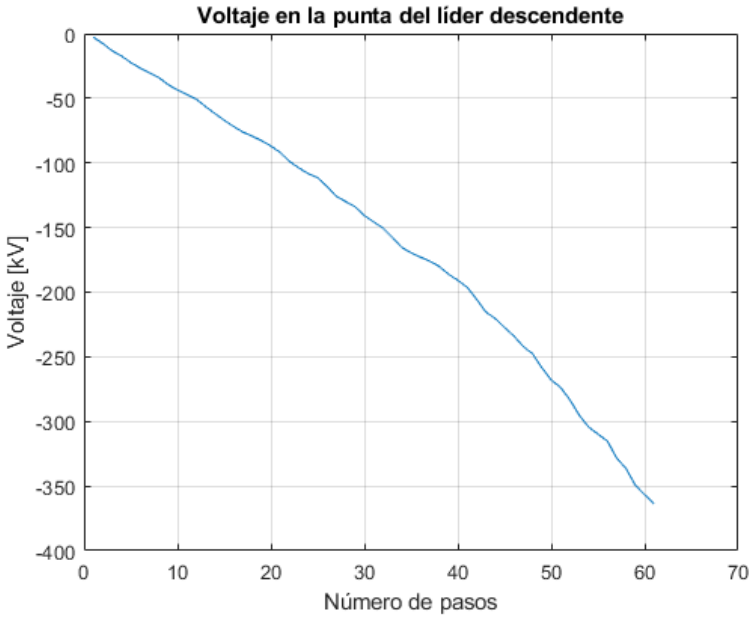

Figura 4.2.7: Voltaje en la punta del líder descendente.

4.2.6. SFR y SFFOR

En la Tabla 4.2.6 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del MLP para la estimación de fallas de apantallamiento.

Parámetro	Tramo altura baja	Tramo altura media	Tramo altura alta
$SFR_{promedio}$	1.06599	0.51287	0.34554
$SFFOR_{promedio}$	1.06599	0.51287	0.34554

Tabla 4.2.4: Resultados aplicación MLP para la estimación de fallas de apantallamiento.

- Todos los rayos que impactan a la línea de transmisión, generan un flameo de aisladores, por lo cual el valor de SFR y SFFOR son iguales.

- De acuerdo con los resultados de las corrientes de impacto, se propone que Si la corriente de rayo es mayor a I_{crit}, se establece que SFR=SFFOR, los cuales deben ser obtenidos a partir de la Ec. 2.4.15. Si la Corriente de rayo es menor a I_{crit}, SFR≠SFFOR, luego SFR se obtiene a partir de la Ec. 2.4.14, mientras que SFFOR por medio de la Ec. 2.4.15.

- De acuerdo con [5] un correcto diseño de línea de transmisión debe poseer un valor de SFFOR menor a 0.05 [rayo/año], mientras que considera como parámetro aceptable un valor de 0.1 [rayo/año]. Los valores de SFFOR obtenidos son mayores a 0.05 [rayo/año], lo que indica que el estado de apantallamiento del trazado de la línea de transmisión es deficiente.

- Debido a que el valor de SFFOR es menor para el tramo de altura alta, se puede decir que es el tramo que posee mayor grado de apantallamiento, lo cual era esperable, ya que a diferencia de los otros dos tramos, posee dos cable de guarda.

4.3. Comparación entre los modelos en estudios

En la Tabla 4.3.1 se presenta una tabla comparativa con los resultados de los modelos MEG y MLP para la estimación de falla de apantallamiento.

Parámetros	Tramo altura baja	Tramo altura media	Tramo altura alta
SFR_{MEG}	2.37 x 10^{-4}	12 x 10^{-4}	0.05 [rayo/año]3 x 10^{-4}
SFR_{MLP}	1.06607	0.51295	0.34562
$SFFOR_{MEG}$	1.93 x 10^{-4}	11 x 10^{-4}	0.04 x 10^{-4}
$SFFOR_{MLP}$	1.06599	0.51287	0.34554
$Tiempo_{MEG}$ [seg]	53	54	53
$Tiempo_{MLP}$[seg]	28800	3120	61200

Tabla 4.3.1: Resultados aplicación MLP para la estimación de fallas de apantallamiento.

Semejanzas

- Los resultados del SFFOR obtenidos para el MEG (Tabla 4.1.1) y para el MLP (Tabla 4.3.1) indican que el tramo con mayor apantallamiento es el tramo de altura alta. Ambos modelos evidencian que un mayor grado de apantallamiento se logra al considerar dos cables de guarda en el diseño de una línea de transmisión.

- Considerando una DEAT vertical y la geometría de las torres pertenecientes a los tramos de altura media y altura baja, el MEG indica que no deben existir impactos a los conductores ubicados en la posición X1 y X3' (tramo altura media y baja). En los resultados de la aplicación del MLP no se observaron impactos a los conductores de las posiciones X1 y X3' para los tramos de altura media y baja. El apantallamiento otorgado por las fases de alturas superiores a las fases ubicadas a menor distancia del suelo, esta presente en ambos modelos.

Diferencias

- Al observar la tabla 4.2.1 se aprecia que todas las corrientes que generan un impacto en la LT estan por encima de los rangos de corrientes que permiten un impacto directo a la LT según el MEG (Tabla 4.1.1).

- De acuerdo con los resultados presentes en la Tabla 4.3.1, los valores de SFR son prácticamente 0 lo que indica que de acuerdo con el MEG no existen impactos directos a la línea de transmisión. En cambio el SFR obtenido a partir de la aplicación del MLP, determina que existe 1 impacto al año en el tramo de altura baja, 1 impacto cada 2 años en el tramo de altura media y 1 impacto cada 3 años en el tramo de altura alta.

- Al comparar los resultados del SFFOR obtenido con el MEG, con el MLP en los 3 tramos en estudio, la conclusión respecto al estado de apantallamiento de la línea de transmisión es diferente, ya que los valores de $SFFOR_{MEG}$ están por debajo de 0.05 [rayo/año], lo que indica según [5] que el estado de apantallamiento es adecuado. Por otra parte los valores de $SFFOR_{MLP}$ están por encima del estándar internacional, y se determina un estado de apantallamiento deficiente para los tramos en estudio.

- Según la Tabla 4.3.1 notamos una gran diferencia entre los tiempos de simulación la ejecución del MEG para cada tramo no superó nunca el minuto, mientras que la simulación del MLP en los tramos de altura baja alcanzó casi 8 horas de simulación, seguido por el tramo de altura alta que tardó 17 horas, finalmente el tramo de altura media tardó 52 minutos en entregar sus resultados. Para las simulaciones realizadas se utilizó un computador ACER AGREGAR MARCA Y MODELO.

- El principal concepto en el cual se diferencian los modelos en estudio, es que el MEG considera una caída del rayo en forma vertical sobre la línea de transmisión y descarta cualquier otra forma de aproximación de la DEAT hacia la LT, mientras que el MLP presenta el descenso del rayo de forma tortuosa, esto permite explicar por que existen rayos que logran evitar la barrera brindada por los cables de guarda e impactan de forma lateral a la línea de transmisión. La tortuosidad del rayo sumado a su aleatoriedad, permiten explicar fenómenos como el que se aprecia en la Fig. 4.3.1.

Figura 4.3.1: Impacto lateral de un rayo a un línea de transmisión doblemente apantallada [9].

Capítulo 5

Conclusiones

A partir de los resultados de SFR obtenidos de la aplicación del MEG, se determina que no habrán impactos a la LT, además se tiene que los 3 tramos poseen un valor de SFFOR aproximadamente cero, esto cumple con los estándares internacionales que indican que un adecuado apantallamiento debe poseer un SFFOR menor a 0.05 [rayo/año].

El ángulo de apantallamiento de los 3 tramos también cumple con lo recomendado por la norma [5], ya que todos los ángulos son menores a 30^o.

Las corrientes críticas de todos los tramos son iguales o mayores al valor mínimo recomendado de 5 [kA] [5]. Los rangos de corrientes para las cuales fue analizada la tasa de fallas de apantallamiento, son muy pequeños y poseen un baja probabilidad de ocurrencia, esto explica los resultados tan bajos de SFR y SFFOR.

Dado que el diseño actual de la línea de transmisión cumple con lo recomendado por la normativa internacional, se puede decir que el estado de apantallamiento de la línea de transmisión es adecuado. A pesar de lo anterior, los resultados obtenidos a partir del MEG no explican las salidas de operación de la línea de transmisión por impacto de rayos.

Según los resultados del SFFOR obtenidos de la aplicación del MLP, indican que existen rayos que impactan a la LT y generan flameo directo de aisladores, además superan el valor estándar de 0.05 [rayo/año]. Lo anterior indica que el actual diseño de la LT posee un apantallamiento ante DEAT deficiente.

La aplicación del MLP permitió detectar ciertas semejanzas del modelo a la realidad física de una descarga eléctrica. El MLP presenta una DEAT tortuosa y aleatoria, la tensión inducida en los objetos en tierra aumenta a medida que el líder descendente se aproxima y la tensión en la punta del líder descendente es mayor mientras mas cerca se encuentra de la tierra(Debido a la carga espacial acumulada). Los impactos de DEAT a la LT muestran que existe un apantallamiento entre las fases de altura superior a las de menor altura. El modelo también incorpora la altimetría del terreno y describe la catenaria en todo el trazado de la LT.

Según el MLP todas las corrientes de los rayos que impactaron a la LT, generan un flameo directo de aisladores, lo que se traduce en que los valores de SFR y SFFOR sean iguales.

Al comparar los resultados de ambos modelos, se encontraron algunas semejanzas tales como, que el tramo de mayor altura posee un menor valor de SFFOR, por lo tanto, posee un mayor grado de apantallamiento ante DEAT. Se puede observar en ambos modelos que la presencia de dos cables de guardas mejora el estado del apantallamiento.

Otra similitud entre los modelos es que los conductores ubicados en las posiciones X1 y X3' de los tramos de altura media y baja, no son alcanzados por una DEAT. Lo anterior es evidencia de que ambos modelos consideran el apantallamiento que otorgan las fases de mayor altura a las fases de alturas menores.

La principal diferencia entre los modelos, radica en el valor de SFFOR y la conclusión del estado de apantallamiento, el MEG indica que el estado de apantallamiento es adecuado, mientras que el LPM señala que dicho estado es deficiente.

Las corrientes que generan un impacto directo a la DEAT según el LPM, se encuentran por encima de los rangos de corrientes que permiten un impacto a la LT de acuerdo con el MEG.

Otra diferencia entre el MEG y el MLP es respecto al tiempo de simulación, ya que el tiempo de simulación del MLP es del orden de horas, mientras que el del MEG es del orden de segundos. Si bien los tiempos de simulación del MLP son altos comparados con el MEG, son bajos en comparación con el tiempo de diseño de un LT.

Con la aplicación del MLP se encontraron algunas semejanzas con las características físicas de una DEAT, en comparación con el MEG los resultados obtenidos podrían explicar de mejor manera el estado real del apantallamiento. A pesar de lo anterior es importante señalar que el MLP es un modelo en desarrollo y antes de ser utilizado en cualquier aplicación, debe ser validado en base a observaciones de campo y un registro fiable de impactos a LT .

Dado el actual desarrollo del MLP y los registros de caída de rayos, se recomienda calcular el estado de apantallamiento mediante el MEG considerando alguna mejoras al modelo, como por ejemplo la utilización de parámetros A y B que representen la realidad ceráunica de Chile, en la actualidad la IEEE [5] recomienda utilizar parámetros que fueron obtenidos en estudios realizados en otros países donde la caída de rayos difiere de la realidad Chilena.

Otras mejoras al MEG son las consideraciones de la oblicuidad del terreno, el ángulo de incidencia del impacto de la DEAT y la caída de la catenaria de la LT. En el estudio [17] presenta algunas alternativas de lo anterior.

La aplicación del MEG para este estudio, indica que el estado de apantallamiento es adecuado, lo que se opone a las fallas reportadas por Collahuasi. Si bien las fallas reportadas se atribuyen a DEAT, no se pueden clasificar como descargas directas a la LT y también existe la posibilidad que exista flameo indirecto de aisladores o un mal estado de las puestas a tierras.

Con respecto a la problemática de Collahuasi, se recomienda evaluar el estado de las puestas a tierras de la LT, realizar un estudio de flameo inverso de aisladores y mejorar los métodos de registro de impactos de DEAT a la LT.

Para seguir el desarrollo del estudio de las fallas de apantallamiento de las LT, se recomienda como trabajos futuros la validación del MLP, por medio del contraste con un registro fiable de impactos de rayos a LT. En la aplicación del MLP Se pueden acortar los tiempos de simulación considerando el acotamiento del tramo de análisis. Otro aspecto que puede ser desarrollado es la consideración de la polaridad de la carga eléctrica AC en el modelo de línea de transmisión. Debido a que el modelo presentado en este estudio permite simular el punto exacto de impacto de un rayo a la línea de transmisión, se puede desarrollar una variante que permita determinar si un rayo que impacta en tierra puede generar flameo inverso de aisladores. Además se deben actualizar los mapas ceráunicos del país.

Referencias

[1] Anon. Ieee Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1981. *Ieee Power Eng Soc Transm Distrib Conf Expo*, 1981.

[2] M. Beccerra and V. Cooray. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 21(2):897–908, 2006.

[3] P. Chowdhuri. Estimation of flashover rates of overhead power distribution lines by lightning strokes to nearby ground. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 4:1982 – 1989, 08 1989.

[4] CIGRE WG01 SC33. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRE Rep. 63*, 01(October):64, 1991.

[5] D. Committee. *IEEE guide for Improving the lightning performance of Transmission Lines*. 1997.

[6] V. Cooray. *The lightning flash*. 2003.

[7] Esinel-Ingenieros. Cálculo parámetros eléctricos. Technical Report 9, 2013.

[8] J. Fuente León and A. Corona Cruz. Fenómenos eléctrico-mecánicos desarrollados en una chispa causada por un pulso: piezoeléctrico. *Latin-American J. Phys. Educ.*, 3(3):26, 2009.

[9] Y. Geng and C. Zhuang. Research on shielding failure of UHVDC based on leader progression model. In *2012 31st Int. Conf. Light. Prot. ICLP 2012*, 2012.

[10] J. He, Y. Tu, R. Zeng, J. B. Lee, S. H. Chang, and Z. Guan. Numeral analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 20(2 I):815–822, apr 2005.

[11] R. Hill. Analysis of irregular paths of lightning channels. *Journal of Geophysical Research*, 73, 03 1968.

[12] R. Hill. Tortuosity of lightning. *Atmospheric Research*, 22:217–233, 10 1988.

[13] T. Horvath. Computation of lightning protection / tibor horvath. *SERBIULA (sistema Librum 2.0)*, 09 2021.

[14] I-SEP-Ingenieros-Spa. Memoria de cálculo de parámetros de línea aérea 2x220 kv lagunas - collahuasi. 2019.

[15] IEEE 1410. *IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*, volume 2010. 2011.

[16] F. Javier, L. Yévenes, and R. Schurch. Estudio del diseño actual del apantallamiento ante rayos de líneas aéreas de alta tensión para Transelec Estudio del diseño actual del apantallamiento ante rayos de líneas aéreas de alta tensión para Transelec. 2017.

[17] V. Jimenez. Desempeño de líneas aéreas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas: Análisis de la falla de apantallamiento en terrenos con topografía agreste. 2013.

[18] H. W. Kasemir. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *Journal of Geophysical Research*, 65:1873–1878, 1960.

[19] P. Krehbiel, X. Shao, R. Thomas, C. Rhodes, and C. Hayenga. VHF Radio Interferometry of Lightning. *Int. Astron. Union Colloq.*, 131(May 2014):372–375, 1991.

[20] Lalande. *No. 4458*. PhD thesis, University of Paris Sud U.F.R. Scientifique D'Orasy, 1996.

[21] Les Renardieres Group. Research on long air gaps, 1973.

[22] J. Montana and J. Silva. Estimation of the lightning parameters in the North Region of Colombia: Results of a study based on linet informatión system and using statistics models. *2013 Int. Symp. Light. Prot. SIPDA 2013*, pages 11–16, 2013.

[23] A. J. Otto and H. C. Reader. Wideband and narrowband HVDC conductor corona test methods for radio noise prediction. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 25(4):2950–2957, 2010.

[24] F. Peek. Dielectric phenomena in high voltage engineering. 1920.

[25] D. Proctor, R. Uytenbogaardt, and B. M. Meredith. Vhf radio pictures of lightning flashes to ground. *Journal of Geophysical Research*, 93:12683–12727, 1988.

[26] V. Rakov, M. Uman, and Y. Raizer. Lightning: Physics and effects. *Physics Today - PHYS TODAY*, 57:63–64, 01 2004.

[27] F. Rizk. Switehing impulse strength of air insulation: Leader inception criterion.

IEEE Power Engineering Review, 9:60–61, 1989.

[28] C. F. Salinas. Determinación de la resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de ingeniería eléctrica. page 96, 2012.

[29] M. R. B. Tavakoli and B. Vahidi. Transmission-lines shielding failure-rate calculation by means of 3-D leader progression models. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 26(2):507–516, 2011.

[30] T. Teer and A. Few. Horizontal lightning. *Journal of Geophysical Research*, 79:3436–3441, 08 1974.

[31] B. Vahidi, M. Yahyaabadi, M. R. B. Tavakoli, and S. M. Ahadi. Leader progression analysis model for shielding failure computation by using the charge simulation method. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 23(4):2201–2206, 2008.

[32] M. Vargas-Lezama. *Nuevo modelo integral del canal de la descarga eléctrica atmosférica y su enlace con estructuras en tierra.* PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2006.

Comparison between Electrogeometric Model and Leader Progression Model for Transmission Lines Shielding Failure Rate

1st Sergio Zumarán Rivera
Department of Electrical Engineering
UTFSM
Valparaíso, Chile
sergio.zumaran.12@sansano.usm.cl

2nd Johny Montaña Chaparro
Department of Electrical Engineering
UTFSM
Valparaíso, Chile
johny.montana@usm.cl

3rd Roger Schurch Brandt
Department of Electrical Engineering
UTFSM
Valparaíso, Chile
roger.schurch@usm.cl

***Abstract*—This paper presents a proposed model to estimate the shielding failure rate based on a variation of Leader Progression Model (LPM) with stochastic characteristics, having less computational time to describe the downward leader into the lightning phenomenon. The integral model of the discharge channel is used to estimate the shielding failure rate and its results are compared to classic electrogeometric model in an overhead transmission line of 220 [kV]. The transmission line is located in the north of Chile in the mountain region where an important lightning activity takes place. The values of Shielding Failure Rate (SFR) and the Shielding Failure Flashover Rate (SFFOR) were computed for both models to make the comparison. The values from LPM are higher, which can be explained because the LPM considers the tortuosity and ramification of the lightning channel.**

***Keywords*—** Leader Progression Model, Electrogeometric Model, Shielding Failure Rate, Shielding Failure Flashover Rate

I. Introduction

Lightnings are one of the causes of blackouts and failures of the electric power systems affecting the power quality of them. Due to the long lengths of overhead transmission lines, they are greatly affected by lightnings. To estimate the shielding status of an overhead transmission line and define the location of the shield wire, the electrogeometric model (EGM) is the most accepted, mainly due to its simple application and efficiency compared to field observations [1]. The EGM is mainly based on empirical studies; this model considers that a lightning descends vertically over the transmission line and it can reach the phase conductor if the downward leader falls in the exposed width of the tower [2]. Despite being an effective model, the EGM is criticized because it does not consider the tortuosity and the ramifications of the lighntinig discharge channel.

Currently, there are models that seek to describe the attachment process between lightning and the objects on the ground, considering the physical characteristics of the phenomenon; one of these models is the leader progression model (LPM). The LPM defines the path of the negative downward leader, the starting criteria for a stable positive upward leader and the criteria for the attachment process between them (Final Jump). From the LPM, models for estimating transmission line shielding faults are generated [3], [4], but since these models use long application times, they are not considered to carry about these studies [1].

The LPM is based on determining the greatest potential gradient in the air in order to find the direction of each step of the lightning channel [5]; unfortunately this process takes considerable simulation time. Therefore, as an alternative to this model, the integral model of the discharge channel was developed, which describes the route randomly based on field observations [1] or the mathematical model presented in [6], which was able to represent the randomness of the lightning phenomenon based on Monte Carlo's simulation of the downward leader.

In [5] a comparisson between EGM and a numerical model which uses the LPM is presented. The results of this study shown that the shielding failure rate for an overhead transmission line in 220 [kV] is slightly higher for the LPM. In [7] a comparisson of two models is presented, for that, a model that includes the LPM criteria to the EGM is used, the results shown that ranges of the lightning current striking the phase conductors of the proposed model are very high compared with the classic EGM.

In [4] the shielding analysis is presented using the LPM for a not flat terrain and the heights of the catenary are not simetrical. This study shown some results that can not be analyzed by means of the EGM as the lateral impacts, due to the EGM considers only vertical lightnings.

The main porpouse of this study is to evaluate the influence of the tortuosity and the ramifications of the lightning in the shielding state of an overhead transmission line (OTL). The analysis will be accomplished by means of a comparison between the EGM and a fault estimation model based on the application of the LPM. Both models will be applied on a 220 [kV] overhead transmission line that has been affected by lightning strikes in the last year. The OTL used for this study is located in the north of Chile for mining facility in the high mountains where there is an important lightning activity. The LPM considers the the randomness of the phenomenon by means of a stochastic process, as well, the catenary is not symmetrical to includ the non uniformity of the ground surface.

II. Electrogeometric Model

A. General consideration

The classic EGM considers that the OTL is located in a flat terrain [2], the model defines the shielding arcs whose center is the shielding wire cable and exposed arcs whose center is the phase cables, see Fig. 1. Based on the geometry, the radius of the arcs and the ground plane, the exposed width W_u and the shielding width W_o are obtained.

The radius of the exposed and shielding arcs are computed by means of the (1), based on the parameters A and B. According to [2], the A and B values are 10 and 0.65, respectively.

$$S(I_1) = A \cdot I_1^B \tag{1}$$

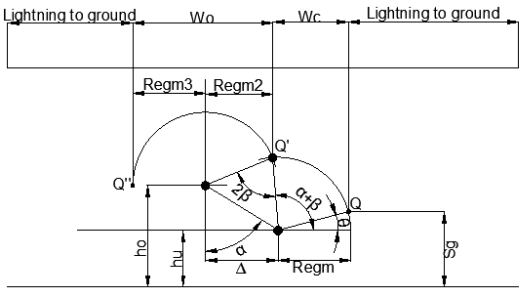

Fig. 1. Shielding on a single-phase line. Shielding arc centered in shielding wire cable and exposed arc centered in the phase cable.

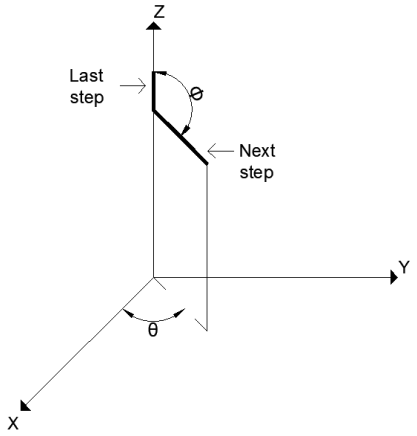

Fig. 2. Leader Progression Model in three dimensions using spherical coordinates.

B. Shielding Failure Computation

In order to evaluate the shielding performance the SFR_1 (2) and $SFFOR_1$ (3) are calculated [8]. The SFR is the Shielding Failure Rate and the SFFOR is the Shielding Failure Flashover Rate.

$$SFR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \qquad (2)$$

$$SFFOR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \qquad (3)$$

The parameters I_{max}, I_{crit} and W_u depend on the geometry of the OTL and the insulation level (BIL) [9], [10]. Aditionally, the model considers the thunderstorm days of the area and the probability $f_1(I)$ [11] of occurrence of the lightning current, which is defined in (4).

$$f_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot I \cdot \sigma_{ln(I)}} \cdot e^{-0.5 \cdot \frac{ln(I) - ln(\overline{I})}{\sigma_{ln(I)}}} \qquad (4)$$

where $\sigma_{ln(I)}$ is the standar deviation of $ln(I)$, $\overline{I}$ [kA] is the mean current value of the first stroke. The Tab. I shows the values proposed by CIGRE [12] for the statistical parameter of the equations.

TABLE I
STATISTICAL PARAMETERS FOR THE FIRST RETURN DISCHARGE.

Parameters	I $\leq$ 20 [kA]	I >20 [kA]
$\sigma_{ln(I)}$	1.33	33.3
$\overline{I}$	61	33

III. Leader Progression Model

A. Downward Leader Progression Model

The LPM defines the path of descending leader between the cloud-storm and the objects on the ground considering the tortuosity and ramifications of the channel. There are some variations of the LPM which are deterministic, it means, they compute for every step of the downward leader the maximun value of the potenctial gradient to determine the direction of the next step [13].

In [1] an integral model of the discharge channel is proposed. This stochastic model based on field observations describes the descending leader in three dimensions using spherical coordinates and allows describing the path of the leader in a limited time.

Considerations of the model:

1) ***Tortuosity***: This model is made by means of spherical coordinates to achieve a 3-dimensional model (see Fig. 2), the following guidelines are considered:
   - ϕ represents the change of channel direction from the vertical axis. The change of direction of the tortuous channel was described by means of a Gaussian distribution with a mean value of 180 [^{o}], the standard deviation of which is adjusted so that the absolute value of the change of direction was approximately 17 [^{o}].
   - ρ represents the length of the downward leader's step. The length of the step leader is generated by means of a uniform distribution between 10m and 100 m, because only the range in which it can vary is known and there is no further information on this regard.
   - θ is described by means of a uniform distribution that varies between 0 and 360 [^{o}], allowing to extend the lightning channel in 3 dimensions.
2) ***Branch***: Branches are considered within the cloud-storm that extend at least 500 [m] [18] and have a slope of 10 [^{o}]. Branches of the downward channel outside the cloud-storm will not be considered in this study.

B. Downward and Upward Leader Model

To determine the amount of charge in the downward leader, the lightning current ratio proposed by [13] is used, this ratio is presented in (5).

$$Q_T = (\frac{I}{25})^{0.7} \qquad (5)$$

Once the total charge of the downward leader is known, a linear scaling is considered that allows finding the lightning charge for every step of the downward leader by means of the (6).

$$Q_i = \frac{1}{\sum C_i} \cdot C_i \cdot Q_T \qquad (6)$$

Where $C_i = ln(\frac{H_c}{h_i})$, H_c is the height of the cloud and h_i is the average between the lowest point (h_{min}) and the highest point (h_{max}) of the step leader. h_i is presented in (7).

$$h_i = \frac{h_{min} + h_{max}}{2} \qquad (7)$$

According to [13], the downward leader presents an electric charge at its tip, which is modeled as a half sphere of radius r_0, as shown in Fig.3.

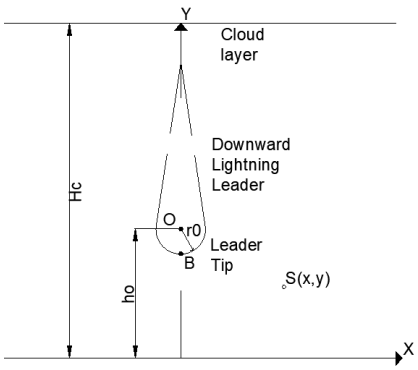

Fig. 3. Representation of the electric charge of the downward leader as a half sphere.

The charge on the tip of the leader can be calculated by (8).

$$Q_0 = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_0^2 \cdot E_c \tag{8}$$

where ϵ is the dielectric constant of the air, and E_c is the critical electric field of the air.

When the concentrated charge at the tip of the leader is known, we can obtain the potential at the tip by means of (9) [3].

$$\begin{aligned} V_B = \frac{-Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot (H_c - h_0)^2} \cdot \\ [(H_c - h_0 + r_0) \cdot ln(\frac{H_c - h_0 - r_0}{r_0}) \\ - (H_c + h_0 - r_0) \cdot ln(\frac{H_c + h_0 - r_0}{2 \cdot h_0 - r_0})] \\ - \frac{Q \cdot r_0}{12 \cdot \epsilon (H_c - h_0)} \cdot (\frac{1}{r_0} - \frac{1}{2 \cdot h_0 - r_0}) \end{aligned} \tag{9}$$

As the downward leader approaches to the ground, it generates an increase of the electric field on the surface of the objects on ground, therefore the potential on the objects can be computed by means of (10).

$$\begin{aligned} V_S = \frac{-2 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot (H_c - h_0)^2} \cdot \\ \int_{h_0}^{H_c} (H_c - h) \cdot (\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) \cdot dh \\ - \frac{Q_0}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot (\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}) \end{aligned} \tag{10}$$

where

$$r_1 = \sqrt{(y-h)^2 + x^2}$$
$$r_2 = \sqrt{(y+h)^2 + x^2}$$
$$r_3 = \sqrt{(h_0-y)^2 + x^2}$$
$$r_4 = \sqrt{(h_0+y)^2 + x^2}$$

C. Stable Upward Leader Inception criterion

Rizk [14], [15] proposed a formula to estimate the necessary induced voltage to initiate and propagate a stable positive leader for horizontal conductors, the formula is presented in (11).

$$U_c = \frac{2247}{1 + \frac{5.15 - 5.49 ln(a)}{d \cdot ln(\frac{2 \cdot d}{a})}} \tag{11}$$

D. Final Jump criterion

The attachment process is the last step of lightning and is known as the **Final Jump**. To complete this last stage successfully, the downward and upward leaders must reach a potential gradient between their tips, which must be greater than or equal to 500 [kV/m] [1]. The final jump depends on the distribution of potential, the direction and speed of both leaders. However, it is possible that even though the upward leader is generated and propagated in a stable manner, it does not meet the downward leader, therefore, the final jump would not be completed.

E. Transmission Line configuration

To estimate the SFR and SFFOR from the LPM, it is required to model the transmission line in 3-dimensions system, for which the description of the phase conductors and shield wire is considered by means of vertical and horizontal lines described by the (12) and (13), as presented in the Fig.4.

$$z = h \cdot \cosh\left(b \cdot (\frac{D}{2} - x)\right) \tag{12}$$

$$b = \frac{2}{D} \cdot ln \frac{H - \sqrt{H^2 - h^2}}{h} \tag{13}$$

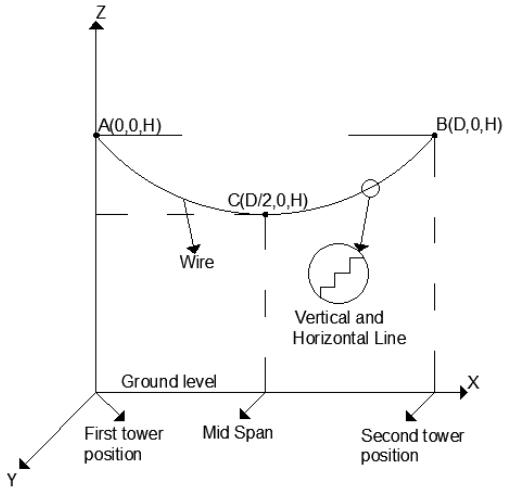

Fig. 4. Three dimensional transmission line model represented by vertical and horizontal pieces.

F. Shielding Failure Computation

The SFR and SFFOR are represented in (14) and (15) respectively. To obtain the range of currents [I_{max}-I_{min}], the complete layout of the transmission line is covered and the points where there is an attachment between both leaders are determined.

$$SFR = 0.1 \cdot T_d \cdot d \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} P(I) \cdot dI \tag{14}$$

$$SFFOR = 0.1 \cdot T_d \cdot d \cdot \int_{I_{cr}}^{I_{max}} P(I) \cdot dI \tag{15}$$

where

$$P(I) = e^{0.05-I/74}$$

G. Application of the leader progression model

The input parameters of the model are: the matrices **x** and **z** which contain the coordinates in x and z of the catenary respectively, the geometry of the tower most representative of the layout, radius of phase and shield wires, the thunderstorms days values T_d [17], attractive width A_d and I_{crit}.

The LPM application procedure for the estimation of shielding failure is presented below:

1) A downward leader is generated randomly. See Fig. 5.
2) The simulation is started with a lightning current of 2 [kA].
3) The analysis begins with the first step of the downward leader.
4) Calculation of Q_T, Q_i and Q_0 using the (5), (6) and (8) respectively.
5) Once the Q_0 value has been obtained, we proceed to calculate V_B (9) at the lowest point of the step leader.
6) The induced voltage V_S is calculated at the point S(i,j) located in the catenary, with i ∈ **matrix x** and j ∈ **matrix z**.
7) It is evaluated if the induced voltage V_S is higher than the critical voltage V_c, when this condition is fulfilled, a stable positive upward leader is started from the point S. If this condition is not fulfilled, the analysis must be carried out at the next point S(i,j+1) in the matrix.
8) Once a stable upward leader is initiated, a vertical gap of 10 [m] is drawn at point S.
9) It must be evaluated if there is an attachment between leaders, for that ($V_S - V_B$)/(distance between points) must be greater than 500 [kV/m]. If the attachment condition is not fulfilled, the process will be repeated in the next step of the downward leader; in the event that the leader's path towards the ground has already been completed, and the current is less than 200 [kA], the process will be repeated increasing the lightning current value by 1 [kA]. If the tracing of the downward leader has already been completed for all lightning current values without attachment fulfilled, the SFR and SFFOR will be zero.
10) If the attachment process is completed, SFR and SFFOR are calculated, using the (14) and (15), respectively.
11) The process is repeated 500 times to obtain the representative mean SFR and SFFOR values. A sample of 500 is chosen in concordance to [1].

IV. Case of Study

To make the comparison between EGM and LPM, the shielding status of an overhead transmission line located in the Andes mountain is used as an object of study. The transmission line is divided into a low-height section, a medium-height section and two high-height sections. The transmission line layout is shown in Fig. 6 [16]. We will focus the analysis on the most representative structures of every section.

The low-heigh and middle-heigh sections have a double-circuit structure with one shielding wire, while the high-heigh sections have a single-circuit structure and have two shielding wires. In Tab. II the coordinates of the phase conductors for each section are presented. Tab. III shows the coordinates of the shielding wires for each section.

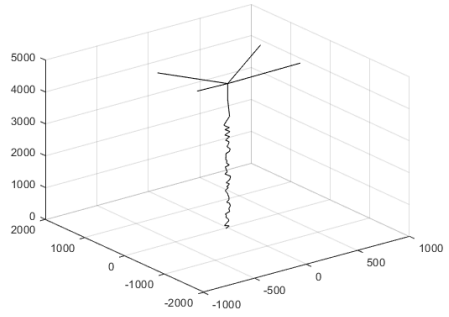

Fig. 5. Downward leader generated randomly in three dimensional space by the Leader Progression Model.

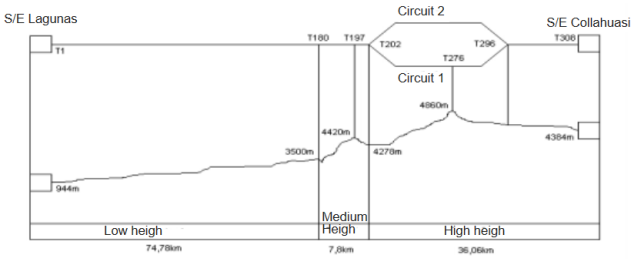

Fig. 6. Layout and sections of the overhead transmission line for the Case of Study.

TABLE II
COORDINATES OF PHASE CONDUCTORS (M).

Zone	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Low H.	2.80	3.28	2.80	15.77	19.77	23.77
	-2.80	-3.28	-2.80	23.77	19.77	15.77
Medium Height	4.58	5.12	4.12	19.31	24.81	30.31
	-4.12	-5.12	-4.58	30.31	24.81	19.31
High Height	4.32	4.82	-4.82	25.81	19.46	19.46
	-	-	-	-	-	-

TABLE III
COORDINATES OF SHIELD WIRE (M).

Zone	XG	YG
Low H.	0	28.82
	-	-
Medium Height	0	37.33
	-	-
High Height	3.22	31.28
	-3.22	31.28

V. Results

A. EGM results

In the Tab. IV, the results obtained from the EGM are presented.

TABLE IV
RESULTS OF ELECTROGEOMETRIC MODEL.

Parameters	Low Heigh	Medium Heigh	High Heigh
Shield Angle	29	30.4	11.4
I_{crit} [kA]	4.96	5.9	4.91
I_{max} [kA]	12.25	19.25	7.03
$SFR * 10^{-4}$	2.37	12	0.053
SFFOR$*10^{-4}$	1.93	11	0.04

Since year 2010, the recommendation for the design of overhead transmission lines is that the shielding angle should be less than 30^o, according to [2] for new overhead lines. Previously, the recomended angle was 45^o. From the results of the shielding angle, it can be seen that their values follow the recommendation of the standard, the sections of low and medium height have an angle close to 30^o.

When the value of the critical current is exceeded, a flashover takes place in the insulators chain. In [2] recommends that transmission lines should be designed considering a critical current value of 5 [kA]. From the results, the critical flashover current is close to the recommended value in the cases of the low-height and high-height sections, while for the medium-height section, the critical flashover current is higher than the recommended value.

The range of currents for which an impact can occur in the phase conductor for the low-height section is 4.96-12.25 [kA], for the medium-height section is 5.9-19.25 [kA], and the high-height section has a range of 4.91-7.03 [kA].

According to [2], the expected value of SFFOR should be less than 0.05 [lightning /year/km^2]. According to the results obtained, all the sections of the overhead transmission line under study presented SFFOR values lower than this recomended value based on EGM.

B. LPM results

In this section the magnitude of current and the number of lightning strikes on the transmission line are presented for the 3 sections under study using the LPM.

From the Tab. V, the minimum values of lightning currents are 22 [kA], 20 [kA] and 7 [kA], for the low-height, medium-height and high-height sections, respectively. We note that the minimum currents for every section are higher than the critical currents presented in Tab. IV. This indicates that any lightning striking the transmission line will generate insulator flashovers. On the other hand, the maximum current that can impact the line is 200 [kA] for the three sections.

TABLE V
LIGHTNING CURRENTS FOR STRIKES ON THE TRANSMISSION LINE.

	Low-Heigh		Medium-Heigh		High-Heigh	
Impacts	I_{Min}	I_{Max}	I_{Min}	I_{Max}	I_{Min}	I_{Max}
1	43	200	57	200	81	200
2	22	200	31	200	136	200
3	72	200	68	200	108	200
4	188	200	20	200	171	200
5	41	200	140	200	177	200
6	135	200	16	200	165	200
7	69	200	15	200	123	200
8	133	200	133	200	93	200
9	138	200	31	200	180	200
10	153	200	137	200	147	200
11	-	-	38	200	33	200
12	-	-	68	200	40	200
13	-	-	164	200	164	200
14	-	-	108	200	7	200

Tables VI and VII show the phases in which the lightning strikes occur on the transmission line, for the three sections. In the case of the sections of medium-height and low-height, the impacts occur in phases 3 and 2 for circuit one, and in phases 1' and 2' in circuit two. For both circuits, there is not impacts on the lowes phases (phase near the ground). For the high-heigh section, the impact of lightning occurs in the outer phases of the transmission line, being the highest phase hitted only by one lightning.

TABLE VI
LIGHTNING STRIKES ON THE PHASE WIRES FOR LOW & MEDIUM HEIGH.

Fases	Low Heigh	Medium Heigh
X3	3	6
X2	2	2
X1	0	0
X3'	0	0
X2'	1	2
X1'	4	4

TABLE VII
LIGHTNING STRIKES ON THE PHASE WIRES FOR HIGH-HEIGH.

Fases	High Heigh
X1	1
X2	5
X3	8

The Tab. VIII presents the results obtained from the application of the LPM for the estimation of shielding failure. As it was mentioned above, all the lightning strikes generate an insulator failure, so the value of SFR and SFFOR are the same.

TABLE VIII
RESULTS OF LPM APPLICATION FOR THE ESTIMATION OF SHIELDING FAILURE.

Parameters	Low-Heigh	Medium-Heigh	High-Heigh
$SFR_{Avarage}$	1.06599	0.51287	0.34554
$SFFOR_{Avarage}$	1.06599	0.51287	0.34554

VI. COMPARISON

In Tab. IX, the results of the SFFOR values obtained from EGM and LPM to estimate the shielding failure rate are presented. It can be seen that both models indicate that the high-heigh section presents a greater shielding rate because it has the lowest SFFOR values, mainly due to the presence of two shielding wires. The worst case of shielding rate is the medium-height section according to the EGM, while the LPM indicates that the section with the least shielding rate is the low-height section.

TABLE IX
RESULTS OF COMPARISON

Parameters	Low Heigh	Medium Heigh	High Heigh
SFR_{EGM}	$2.37{\cdot}10^{-4}$	$12{\cdot}10^{-4}$	$0.053{\cdot}10^{-4}$
SFR_{LPM}	1.06607	0.51295	0.34562
$SFFOR_{EGM}$	$1.93{\cdot}10^{-4}$	$11{\cdot}10^{-4}$	$0.04{\cdot}10^{-4}$
$SFFOR_{LPM}$	1.06599	0.51287	0.34554
$Time_{EGM}$ [seg]	53	54	53
$Time_{LPM}$[seg]	28800	3120	61200

The EGM proposes that it is not possible for a lightning to impact the lowest phase of the medium-height and low-height sections, due to the shielding provided by phases 2 and 3 that are located above phase 1 in the case of the first circuit, and the shielding provided by phases 1 'and 2' located above phase 3' in the second circuit. The LPM does not rule out this possibility, however no lightning strikes were recorded at phase 1 or phase 3 ' using LPM analysis.

The current range considered by the EGM model for the low-heigh section is 4.96 to 12.25 [kA], while the LPM shows that all current values that impact the transmission line are above the current range delivered by the MEG.

Comparing the results obtained for the SFR parameter, the EGM values are close to zero in the 3 sections of the overhead lines, therefore this low values indicate that the lightning impact on the phases of the transmission line is unlikely. On the other hand, the SFR values obtained from the LPM determine that lightning impacts to the phases are likely and the SFR values are higher than the EGM values.

VII. Conclusions

The electrogeometric model (EGM) and a variation of the leader progression model (LPM) with stochastic characteristics were presented. A detailed description of the LPM was presented with an application procedure, which can be implemented in future studies.

The two models were used to compute the estimation of shielding failure in an overhead transmission line (OTL) located in the north of Chile. The results from EGM obtained in the OTL indicated that the shielding should be adequate, taking into account the thunderstorms days of the zone. However, in practice, in service experience, there are repeated failures due to lighnting on the OTL under analysis. The reason could be that SFR and SFFOR values are underestimated.

The comparison between models showed that the SFR and SFFOR values have big differences. The values obtained by EGM are around 10^{-4}, while the values with LPM are around 10^{-1}. The differences are attributed to the range of currents for which an impact can occur in the phase conductor, obtained for every model. The range for EGM is between 4 kA and 20 kA, while the range for LPM is between 7 kA and 200 kA.

Another important difference between the models is that the computational time for LPM is higher than EGM. The computational time to calculate the SFR and SFFOR with LPM could be hours, in contrast the EGM could be minutes.

The LPM results could reflect more adequately the actual behaviour of the OTL against lightning strikes. However, without technical reports from relays or other protection devices we can not establish if the LPM values are suitable. These analyses have to be accomplished in future works to evaluate the results of LPM.

References

[1] M.Vargas Nuevo modelo integral del canal de la descarga eléctrica atmosférica y su enlace con estructuras en tierra. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia 2006.

[2] IEEE 1410, IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines, vol. 2010, no. January. 2011.

[3] M. R. B. Tavakoli and B. Vahidi, Transmission-lines shielding failure-rate calculation by means of 3-D leader progression models IEEE Trans. Power Deliv., vol. 26, no. 2, pp. 507–516, 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2042183.

[4] Q. Yang, J. Tao, and W. Sima, "Analysis of shielding failure in transmission lines considering complex terrain," 2017 Int. Symp. Light.

[5] J. He, Y. Tu, R. Zeng, J. B. Lee, S. H. Chang, and Z. Guan, "Numeral analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 2 I, pp. 815–822, Apr. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839189.

[6] I. Sarajčev, P. Sarajčev, and S. Vujević, "Mathematical model of lightning stroke development," in SoftCom 2008: 16th International Conference on Software, Telecommuncations and Computer Networks, 2008.

[7] C. Zhuang, R. Zeng, Q. Li, H. Liu, Z. Yu, and J. He, "Improve the electrogeometric model by the analysis results of leader propagation model for transmission lines," in 2014 International Conference on Lightning Protection, ICLP 2014.

[8] V. Jimenez, "Desempeño de líneas aéreas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas: Análisis de la falla de apantallamiento en terrenos con topografía agreste", Tesis de Maestría, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2013.

[9] Gonen Turan "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design."

[10] Endesa, "Redes de energía eléctrica-Líneas de transmisión" 1982.

[11] D. Committee, IEEE guide for Improving the lightning performance of Transmission Lines. 1997.

[12] CIGRE WG01 SC33, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," CIGRE Rep. 63, vol. 01, no. October, p. 64, 1991.

[13] B. Vahidi, M. Yahyaabadi, M. R. B. Tavakoli, and S. M. Ahadi, Leader progression analysis model for shielding failure computation by using the charge simulation method IEEE Trans. Power Deliv., vol. 23, no. 4, pp. 2201–2206, 2008.

[14] F. Rizk. Switehing impulse strength of air insulation: Leader inception criterion.IEEE Power Engineering Review, 9:60–61, 1989.

[15] F. Rizk.Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes. Transactions on power delivery. 1990.

[16] Esinel-Ingenieros, "Memoria de calculo parámetros eléctricos líneas de alta tensión", 2013.

[17] J. Montana and J. Silva. Estimation of the lightning parameters in the North Regionof Colombia: Results of a study based on linet informatión system and using statisticsmodels.2013 Int. Symp. Light. Prot. SIPDA 2013, pages 11–16, 2013.

[18] V. Rakov, M. Uman, and Y. Raizer. Lightning: Physics and effects.Physics Today- PHYS TODAY, 57:63–64, 01 2004.