



Análisis de apantallamiento ante rayos para la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre mediante modelo electro-geométrico y modelo de líder progresivo

Francisco Jesús Oyarzo Arce

2024

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Electricista

Profesor Patrocinante 1:
Dr. Johny Hernán Montaña Chaparro (UTFSM)

Profesor Patrocinante 2:
Dr. Victor Hinojosa Mateus (UTFSM)

Valparaíso, 16 de agosto de 2024.



Análisis de apantallamiento ante rayos para la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre mediante modelo electro-geométrico y modelo de líder progresivo

Francisco Jesús Oyarzo Arce

2024

*“Si tuviera la suerte de alcanzar alguno de mis ideales, sería en nombre de toda la
humanidad.”*
— *Nikola Tesla*

Agradecimientos

Quiero dedicar esta parte de mi trabajo a las personas que me acompañaron durante esta larga travesía, sin ellos yo no hubiese logrado llegar aquí.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis compañeros del departamento de ingeniería eléctrica de la USM. Mis colegas que conocí desde el 2014, con quienes luche, llore y reí en estos muy largos años y con quienes espero compartir a futuro en el mundo laboral. Agradezco en especial a mis colegas del área de Alta tensión Rubén Valenzuela, Sergio Zúmaran, Sergio Rosales, Daniel Torres y a Leandro, a mis compañeros Felipe Bustos, Roberto Riquelme, Guillermo Huerta, Diego Vera, Sofia Dawson, Enrique Osorio y Braulio Vera, quienes fueron muy importantes en el final de la carrera. Agradezco igual a los ingenieros Yuri Pinto, Eduardo Illianes, Luis Contreras, Cristian Chandia y Cristian González quienes me apoyaron durante mi periodo de práctica en el verano y otoño del año 2023. A mis amigos del alma Carlos Ojeda, Esteban Vidal, Belén Aguilar y Macarena Fernandez con quienes he compartido mucho desde la escuela y me acompañaron en esta aventura universitaria.

A todos mis profesores de quienes aprendí durante mi estadía universitaria, sobre todo a los profesores Johny Montaña, Víctor Hinojosa y Roger Schurch quienes me apoyaron en múltiples ocasiones durante la carrera y en la elaboración de esta memoria.

Por último, quiero agradecer a mi familia, mis abuelos, tíos, sobrinos, primos y a mis hermanos Daniel y Andrea que siempre han creído en mí, y finalmente a mis padres que lo son todo para mí en la vida.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	I
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
Resumen	VIII
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcance	3
1.3. Estructura del estudio	3
2. Sobre el proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre.	4
2.1. Aspectos generales del proyecto	4
2.2. Ventajas de la transmisión en HVDC	5
2.3. Aspectos generales de las torres	7
2.4. Operación bipolar y DMR	9
2.5. Respecto al flujo de potencia	10
3. Detalle de las metodologías.	12
3.1. Física del rayo	12
3.1.1. Respecto a los tipos de descargas atmosféricas	12
3.1.2. Etapas de las descargas	14
3.1.3. Inicio de la descarga	15
3.1.4. Líder escalonado	16
3.1.5. Proceso de enlace	16
3.1.6. Primera descarga de retorno	17
3.1.7. Proceso J y K	18
3.1.8. Líder dardo	18
3.1.9. Descargas subsecuentes	18
3.1.10. Morfología del líder ascendente ante impulsos	19
3.2. Modelo electro-geométrico	21
3.2.1. Aplicación sobre líneas	22
3.2.2. Corriente máxima de falla de apantallamiento	24
3.2.3. Ángulo de apantallamiento perfecto	25

3.2.4.	Evaluación de las tasas de falla de apantallamiento	26
3.2.5.	Aplicación del modelo electro-geométrico para líneas HVAC	27
3.3.	Modelo de líder progresivo	29
3.3.1.	Modelo líder descendente	29
3.3.2.	Origen del líder ascendente	31
3.3.3.	Unión de los líderes	31
3.3.4.	Evaluación de las tasas de falla de apantallamiento	32
3.4.	Actualizaciones de los modelos tradicionales	33
3.4.1.	Actualizaciones al MEG	33
3.4.2.	Actualizaciones al MLP	33
3.4.2.a.	Actualizaciones al calculo de los SFFOR	33
3.4.2.b.	Actualización al criterio de líder ascendente	33
3.5.	Aplicación del modelo de líder progresivo para líneas HVAC	36
4.	Aplicación de los modelos electro-geométricos y de líder progresivo en la línea Kimal-Lo Aguirre	37
4.1.	Parámetros de las torres	37
4.2.	Otros parámetros	42
4.2.1.	Días de tormenta	42
4.2.2.	Ancho de captación	42
4.3.	Aplicación del modelo electro-geométrico	42
4.3.1.	Consideraciones generales	42
4.3.2.	Descripción del modelo	43
4.3.3.	Actualización del MEG	44
4.4.	Aplicación del modelo de Líder Progresivo	44
4.4.1.	Simulación líder descendente	44
4.4.2.	Respecto a línea de transmisión	45
4.4.3.	Consideraciones tasa de falla	45
4.4.4.	Descripción del MLP	45
4.4.5.	Actualización para el modelo actualizado	47
4.5.	Operación en estado de emergencia	50
5.	Análisis y resultados	51
5.1.	Resultados aplicación del MEG	51
5.1.1.	Corriente crítica de flameo en los aisladores	53
5.1.2.	Corriente máxima	53
5.1.3.	Ángulo de apantallamiento y ángulo de apantallamiento perfecto	53
5.1.4.	Análisis del SFR Y SFR estandarizados	53
5.1.5.	Análisis del SFFOR y SFFOR estandarizado	54
5.1.6.	Ancho expuesto vs corriente	55
5.1.7.	SFR específico vs corriente de rayo	56
5.1.8.	SFR específico vs ancho expuesto	57
5.2.	Resultados del la aplicación del MLP	58
5.2.1.	Simulación del líder descendente	58
5.2.2.	Respecto a las corrientes de rayo	60
5.2.3.	Tasas de falla por apantallamiento	61
5.2.4.	Tensión de la punta del líder descendente	62
5.2.5.	Evaluación mejorada del SFFOR para MLP	62

5.2.6. Evaluación mejorada del líder ascendente para MLP	63
5.3. Comparación entre modelos tradicionales	65
5.4. Resultados en estado de emergencia	66
5.5. Tiempos de simulación	67
6. Resumen final y conclusiones.	68
Bibliografía	71
A. Sobre el proyecto Kimal-Lo Aguirre	75
B. Capacidad instalada	78
C. Tecnologías de conversión	79
C.1. Convertidores tipo LCC	79
C.2. Convertidores tipo fuente de tensión	80
D. Modelo de línea de transmisión	81
E. Aplicación del MEG en Antofagasta bajo parámetros de Wagner y Hilleman	83

Índice de figuras

2.1.	Comparativa de pérdidas [MW] para líneas de alta tensión. [18]	6
2.2.	Comparativa de costos para sistemas de transmisión según longitud de la línea. [19]	7
2.3.	Esquema torre atirantada. [16]	8
2.4.	Esquema torre autosoportante. [16]	9
2.5.	Esquema de sistema HVDC bipolar con retorno metálico. [19]	10
2.6.	Simulación del flujo de potencia 2030 con línea HVDC incorporada. [2] . .	11
2.7.	Simulación del flujo de potencia 2030 sin línea HVDC incorporada. [2] . .	11
3.1.	Estructura de carga de nubes de tormenta y tipos de descarga. [22]	13
3.2.	Los cuatro tipos de rayos nube-tierra. [22]	14
3.3.	Etapas de descarga para rayo nube-tierra negativo. [22] [24]	15
3.4.	Modelo conceptual del canal del líder. [8]	16
3.5.	Diagrama y montaje del experimento de impulsos sobre conductor DC. [32]	19
3.6.	Inicio del líder estable según tensión de línea DC. [33]	20
3.7.	Diagrama del experimento de impulsos sobre conductores AC y aterrizados. [35]	21
3.8.	Aplicación de los MEG para un solo conductor sin apantallar. [5]	22
3.9.	Aplicación del MEG para un solo conductor apantallado, definición de ángulos y distancias. [5]	23
3.10.	Definición de la corriente máxima de falla de apantallamiento. [5]	25
3.11.	Modelo de una Línea de transmisión trifásica apantallada. [5]	28
3.12.	Esquema de formación de pasos de líder. [42]	29
3.13.	Líder descendente. [43]	30
3.14.	Evaluación del criterio de unión líderes. [41]	32
3.15.	Distribución de potencial en el streamer para el modelo auto-consistente de Becerra. Polo negativo y positivo. [46]	34
4.1.	Torre representativa G6KL. [16]	38
4.2.	Torre representativa GR6KL. [16]	39
4.3.	Torre representativa S6KL. [16]	40
4.4.	Aplicación de la metodología MEG. Elaboración propia.	44
4.5.	Aplicación del MLP para estimación de fallas de apantallamiento. Elaboración propia.	47
4.6.	Evaluación del líder ascendente. Elaboración propia.	49
5.1.	Ancho expuesto según corriente de DEAT. Elaboración propia, ...	56
5.2.	SFR específico vs corriente. Elaboración propia.	57
5.3.	SFR específico según ancho expuesto. Elaboración propia.	58

5.4.	Modelo del líder descendente 3D. Elaboración propia.	59
5.5.	Modelo del líder descendente en planos 2D. Elaboración propia.	59
5.6.	Coordenadas finales del líder ascendente. Elaboración propia.	60
5.7.	Tensión Punta Líder Descendente. Elaboración propia.	62
A.1.	Localización general del proyecto. [18]	75
A.2.	Ilustraciones de franja de seguridad [18]	76
A.3.	Proyección del Sistema de Transmisión. [2]	77
B.1.	Capacidad del SEN marzo 2024. [53]	78
C.1.	Esquemático de tecnología LCC de 12 pulsos para línea HVDC bipolar. [55]	79
C.2.	Esquemático de tecnología VSC para línea HVDC. [55]	80
D.1.	Representación de catenaria entre torres. [57]	81

Índice de tablas

2.1.	Etapa de ingeniería proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre.	5
2.2.	Etapa de medio ambiente proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre.	5
3.1.	Tiempos de inicio del streamer y líder ascendente para diferentes tensiones aplicadas. [32]	19
3.2.	Datos de interrupciones de rayos para el sur de China. [32]	20
3.3.	Parámetros estadísticos para la primera descarga.	26
4.1.	Longitud de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre por zona.	37
4.2.	Coordenadas de los conductores, guarda y DMR en metros.	40
4.3.	Significado de las coordenadas de conductores de la línea HVDC.	41
4.4.	Características del conductor de polo.	41
4.5.	Características del DMR.	41
4.6.	Características del cable de guarda OPWG.	42
4.7.	Días de tormenta anuales por región.	42
4.8.	Ancho de captación de rayos.	42
4.9.	Parámetros modelo líder ascendente	49
5.1.	Aplicación del MEG sobre línea en operación nominal.	51
5.2.	Aplicación del MEG sobre línea sin cable guarda con apantallamiento ofrecido por el DMR.	51
5.3.	Resultados modelo electro-geométrico.	52
5.4.	Ángulos de apantallamiento perfecto.	53
5.5.	Numero de impactos y sus corrientes para el MLP.	60
5.6.	Impactos sobre conductores aplicación del MLP tradicional sobre la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre.	61
5.7.	Resultados aplicación del MLP para la estimación de fallas de apantallamiento.	61
5.8.	Valores de tasa de flameo por falla de apantallamiento para evaluación de tasa mejorada del MLP.	63
5.9.	Numero de impactos y sus corrientes para el MLP actualizado.	63
5.10.	Impactos sobre conductores aplicación del MLP actualizado sobre la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre.	64
5.11.	Resultados de las distintas tasas de falla de apantallamiento del MLP actualizado.	64
5.12.	Resultados aplicación de MEG Y MLP para obtención de tasas anuales de falla de apantallamiento y de flameo por falla de apantallamiento.	65
5.13.	Resultados aplicación de MEG Y MLP para obtención de tasas de flameo por falla de apantallamiento ante condición de emergencia.	66

5.14.	Corrientes críticas para el conductor DMR (+) energizado en 75[kV]. . . .	67
5.15.	Tiempos de simulación de los MEG Y MLP.	67
E.1.	Resultados MEG Antofagasta con parámetros de Wagner y Hilleman . . .	83

Resumen

La línea de transmisión Kimal-Lo Aguirre, será la primera línea de transmisión de alta tensión en corriente continua de Chile. Pertenece a una serie de proyectos relacionados al proceso de descarbonización de la matriz energética nacional. Este trabajo surge de la necesidad, de analizar el grado de protección de esta nueva línea, respecto a descargas atmosféricas.

El estado de apantallamiento es obtenido mediante el uso del modelo electro-geométrico y el modelo de líder progresivo. A fin de obtener resultados congruentes con los registros históricos de tasas de falla de apantallamiento para líneas HVDC bipolares, se aplicaron modelos actualizados. Estos modelos actualizados, incorporan en sus análisis, la tensión de operación de la línea, en conjunto a aspectos morfológicos del líder ascendente proveniente de conductores.

La evaluación del apantallamiento de la línea, mediante el modelo electro-geométrico tradicional y actualizado, cumple con tener un apantallamiento adecuado, tanto en operación nominal como en fallas. Los resultados obtenidos mediante los diferentes modelos de líder progresivo, señalan deficiencia en el estado de apantallamiento y presencia de impactos que causan flameo en los aisladores.

Los resultados favorecen a los modelos de líder progresivo porque integran mejor los aspectos de formación del rayo y los criterios de unión de líderes para determinar descargas atmosféricas. No obstante, su desventaja es que requieren más tiempo de ejecución, especialmente los modelos actualizados, ya que es necesario verificar la formación del líder ascendente.

Todos los modelos aplicados son validos también para líneas de transmisión en corriente alterna de alta tensión. La principal diferencia en los resultados obtenibles, respecto a las líneas de transmisión en corriente continua, recae en la disposición y cantidad de los conductores y de los cables de guarda.

Abstract

The Kimal-Lo Aguirre transmission line will be the first high-voltage direct current transmission line in Chile. It is part of a series of projects related to the decarbonization of the national energy matrix. This work arises from the need to analyze the level of protection of this new line against lightning strikes.

The shielding status is obtained using the electrogeometric model and the leader progressive model. To obtain results, bases on historical records of shielding failure rates in bipolar HVDC lines, This study propose improved models that incorporate the operating voltage of the line along with morphological aspects of the upward leader from the conductors.

The evaluation of the Kimal-IO Aguirre shielding line, using both the traditional and improved electrogeometric models, ensures adequate protection during nominal operations and fault conditions. However, the results obtained from differents leader progression models, reveal deficiencies in the shielding status and the presence of flashovers on the insulators.

The results support the leader progression models because they better account for lightning formation and leader junction criteria to determine atmospheric discharges. However, their limitation is that they require more processing time, especially the updated models, as it is necessary to verify the formation of the upward leader.

All the applied models are also valid for HVAC lines. The main difference in the obtainable results, compared to HVDC lines, rests in the arrangement and quantity of the conductors and the shield wires.

Capítulo 1

Introducción

La futura línea de transmisión HVDC Kimal-Lo Aguirre marcará un hito en Chile al convertirse en la primera línea de su clase en el país. Se espera que esté operativa para el año 2029 [1]. Este proyecto incluirá la instalación de estaciones convertidoras tanto en la subestación Kimal, situada en el norte, como en la subestación Lo Aguirre, en el centro del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [1]. La línea Kimal-Lo Aguirre consistirá en una línea de carácter bipolar de $600 \pm$ [kV], con capacidad nominal de 3000[MW] y que se extiende desde la región de Antofagasta hasta la región de Santiago con una extensión aproximada de 1400[km].

La línea Kimal-Lo Aguirre es parte de una serie de proyectos a nivel nacional perteneciente al proceso de descarbonización de la matriz energética nacional. Estos proyectos implican el retiro o reconversión de centrales eléctricas que funcionan con carbón, así como la incorporación de nuevas centrales de energías renovables con la finalidad de reducir los gases de efecto invernadero (GEI). Dado el alto potencial de la zona norte en energías renovables variables y la imperante demanda de la zona central, es necesario transmitir grandes cantidades de energía a largas distancias minimizando las pérdidas. Considerando las proyecciones de demanda para la próxima década, resulta necesario incorporar nuevas líneas en el sistema. De esas líneas, Kimal-Lo Aguirre asume gran importancia desde un punto ingenieril [2], así como socio-económico [1].

En lo que concierne a líneas de transmisión, se debe tener en cuenta la incorporación de protecciones ante descargas atmosféricas. Estas descargas, en su mayoría son entre nube y tierra con polaridad negativa [3]. Si bien una jaula de Faraday eliminaría por completo la influencia del campo electrostático atmosférico, en la práctica resulta inviable. Por ello, los principales sistemas de apantallamiento de líneas se componen de cables de guarda [4].

La protección otorgada a la línea depende en gran medida de la posición efectiva del cable de guarda. Se han desarrollado varios métodos clásicos basados en criterios geométricos, como el método de Charles o el de Langrehr [5]. A pesar de ello, el enfoque más utilizado para el estudio de apantallamiento es el modelo electro-geométrico (MEG) [6]. Este modelo se basa en una serie de estudios preliminares donde la caída del rayo ocasiona impacto por medio de un acercamiento a una distancia crítica, dada la formación e interacción de líderes descendentes y ascendentes [7]. A pesar de ser un método sencillo de modelar, sus resultados obvian factores como la tortuosidad del rayo, ángulo de impacto e inclinación del terreno [4]. Es por eso, que se utiliza el modelo de líder progresivo (MLP),

el cual describe de mejor forma la formación del líder descendente del rayo, incluye las propiedades físicas del rayo y un análisis detallado de la unión del líder descendente con el líder ascendente [8] [9].

En particular para líneas de corriente continua de alta tensión (HVDC o high voltage direct current, en inglés), se sugiere el uso del MLP para líneas sobre 500[kV], ello se debe a condiciones favorables para la formación de lideres ascendentes positivos ante el descenso del líder atmosférico [10]. Para la línea Kimal-Lo Aguirre, resulta un aporte de interés para los modelos, la incorporación de un conductor metálico dedicado (DMR) [1].

Si bien ya se han efectuado comparativas de los modelos sobre líneas HVAC en Chile [11], la importancia de este trabajo radica en trabajar sobre una nueva tecnología de transmisión en el país. Para trabajos con líneas HVDC con DMR, se tienen aquellos que están enfocados en el análisis de la tensión de impulso en los conductores y su propagación [12], como también en flujos de potencia [2].

Para este trabajo se introducen cambios en el MEG y MLP, orientados en la incorporación de la tensión de la línea como elemento activo, ya sea en la evaluación de los índices de falla por impacto o bien como criterio de estabilidad para el líder ascendente, robusteciendo la morfología del rayo para el análisis de impacto. Dichas mejoras se han incorporado en estudios de líneas HVAC [13] y en HVDC [14], ello ha permitido identificar diferencias según el tipo de corriente de transmisión.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Analizar alternativas de apantallamiento de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre mediante el modelo electro-geométrico y el modelo de líder progresivo.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar revisión bibliográfica asociada a los modelos electro-geométrico y de líder progresivo enfocados al apantallamiento de líneas HVDC, incluyendo comparativas con apantallamiento en HVAC.
- Determinar el nivel de apantallamiento contra rayos en la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre, mediante la aplicación del modelo electro-geométrico y el modelo de líder progresivo.
- Analizar alternativas de sensibilidad en la distancia entre conductores y su disposición, para tramos de línea pertenecientes a zonas geográficas que posean mayor formación de descargas atmosféricas, con la finalidad de obtener menores tasas de falla en las líneas.

1.2. Alcance

El alcance de este trabajo comprende la evaluación del estado de apantallamiento de la línea KImal-Lo Aguirre mediante los modelos electro-geométricos y de líder progresivo. La línea será modelada computacionalmente mediante el uso Matlab para su evaluación. Para se desarrollará un código de evaluación de los distintos modelos tradicionales y avanzados que permiten obtener indicadores de falla de apantallamiento, considerando los parámetros constructivos y geográficos de la línea de transmisión.

1.3. Estructura del estudio

Respecto a la estructura del documento de esta memoria. En el primer capítulo, se ofrece una introducción detallada al tema, acompañada de los principales objetivos que guiarán el desarrollo de este trabajo de memoria. Para el segundo capítulo se presentan las principales características sobre el proyecto de transmisión Kimal-Lo Aguirre, comentando aspectos económicos, sociales, ingenieriles y lo más importante, su aporte en operación en la matriz energética nacional. En el tercer capítulo se da un detalle de las metodologías para el análisis de apantallamiento, explicando fenómenos de generación de rayos e impactos sobre la línea. Indicando en las mismas, diferencias al trabajar con una línea atípica HVDC. El cuarto capítulo se centra en la aplicación de los modelos a lo largo de la línea Kimal-Lo Aguirre, donde se detallan criterios ingenieriles fundamentales para su correcta implementación. En el quinto capítulo se entregan los resultados con su respectivo análisis finalizando con un capítulo de conclusiones.

Capítulo 2

Sobre el proyecto HVDC Kinal-Lo Aguirre.

2.1. Aspectos generales del proyecto

Ante la emergencia global causada por el cambio climático, Chile se ha comprometido a un proceso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para ello, se reemplazará la energía generada por centrales a carbón por centrales de energía renovable. La Comisión Nacional de Energía, por medio del Informe Técnico Final del Plan de Expansión Anual de Transmisión [15], señaló la necesidad de incorporar una línea de transmisión de corriente continua en alta tensión (High-voltage direct current, HVDC) a fin de transportar la energía renovable proveniente de la zona norte del país. El proyecto “Línea de Transmisión Eléctrica HVDC Kinal-Lo Aguirre” se va a llevar a cabo por un Consorcio integrado por ISA Inversiones Chile SpA, Transelec Holdings Rentas Limitada y China Southern Power Grid International (HK) Co. Limited [16].

“Línea de Transmisión Eléctrica HVDC Kinal-Lo Aguirre” es un proyecto con tecnología de conmutación LCC, que considera la construcción de una línea de transmisión eléctrica (LTE) HVDC, bipolar, con capacidad nominal de 3000[MW] (1500[MW] por polo) y tensión de ± 600 [kVdc]. Dado criterios de continuidad de operación en la transmisión energética y la elevada resistividad del suelo en la zona norte, El proyecto “Línea de Transmisión Eléctrica HVDC Kinal-Lo Aguirre”, contará con un cable de guarda y con retorno metálico dedicado (*Dedicated Metallic Return*, DMR). El proyecto inicia desde la subestación Kinal en la región de Antofagasta y termina en la subestación Lo Aguirre en la región Metropolitana (R.M.) [16].

En el proyecto se incorporan estaciones convertidoras de corriente alterna a corriente continua y viceversa en las subestaciones Kinal y Lo Aguirre respectivamente. en conjunto a los paños de conexión requeridos en las subestaciones existentes. También el proyecto contempla las obras civiles necesarias para la ejecución y puesta en marcha de la línea.

Las etapas del desarrollo del proyecto Kinal-Lo Aguirre se indican en las Tablas 2.1 y 2.2 [17]. La Tabla 2.1 muestra cronológicamente las etapas del proyecto HVDC Kinal-Lo Aguirre en aspectos de ingeniería, en tanto la Tabla 2.2 corresponde a las etapas de evaluación medioambiental del proyecto. Ambas tablas detallan las fases del proyecto abarcando el período desde el año 2021 hasta el año 2029.

Etapa de ingeniería	Periodo	Especificaciones
Ingeniería básica	2021-2022	Estudio HVDC, convertidores y conexiones en AC.
Gestión predial	2021-2022	Servidumbres, concesiones, tasaciones.
Contratación suministros	2023-2024	Estructuras, cables, aisladores, convertidores, etc.
Ingeniería de detalle	2023-2024	Transformadores, reactores, refrigeración.
Construcción y montaje	2025-2026	Obras civiles de montaje y tendido.
Pruebas	2028	HVDC, S/E, conexiones AC.
Puesta en servicio	2029	Pruebas previas y energización.

Tabla 2.1: Etapa de ingeniería proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre.

Etapa de medio ambiente	Periodo	Especificaciones
Elaboración del estudio de impacto ambiental	2021-2022	Formulación de bases. Participación ciudadana.
Tramitación EIA en el sistema de impacto ambiental	2023-2024	Consulta indígena. Relacionamiento comunitario.
Etapa de construcción	2025-2028	Relacionamiento comunitario. Implementación de compromisos socio-ambientales.
Etapa de operación	2028-2029	Relacionamiento permanente humano Seguimiento de compromisos socio-ambientales.

Tabla 2.2: Etapa de medio ambiente proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre.

2.2. Ventajas de la transmisión en HVDC

La transmisión en HVDC involucra la incorporación en las subestaciones de sistemas de rectificación e inversión. Ello permite, integrar sistemas de diferentes amplitudes y frecuencias, las que se transformaran a corriente continua, y finalmente se verá invertida en corriente alterna [18].

Emplear corriente continua trae una serie de ventajas ya que se tienen menores pérdidas en los conductores para un mismo nivel de potencia, respecto a una línea de transmisión en corriente alterna. Debido a que en esta ultima la ras pérdidas se ven incrementadas debido al aumento de la resistencia por efecto piel, además de contar con un mayor numero de conductores.

Dada la longitud de la línea del proyecto, resulta conveniente el uso de tecnología de transmisión HVDC. Otras características beneficiosas respecto al ámbito energético es contar con un control rápido de flujo de potencia [19]. La Figura 2.1 ilustra la comparativa de pérdidas dada la corriente empleada en la transmisión según el largo de la línea. En ella se aprecia que a partir de unos 500[km] las pérdidas [MW] resultan ser mayores en la transmisión en corriente alterna debido al efecto piel.

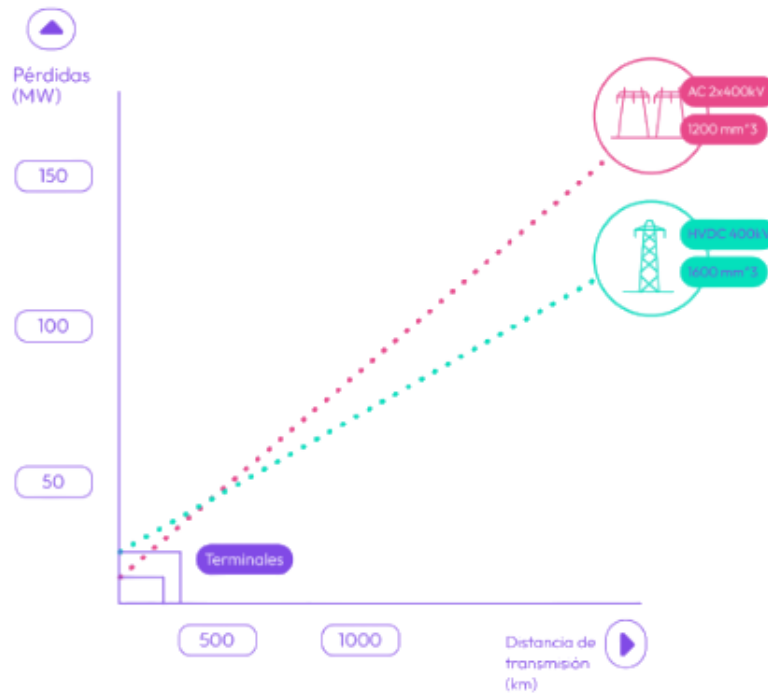


Figura 2.1: Comparativa de pérdidas [MW] para líneas de alta tensión. [18]

Respecto al costo del proyecto, si bien el costo inicial de un sistema HVDC supera al sistema HVAC, debido a la implementación de las subestaciones convertidoras, la inversión total para el proyecto resulta mucho menor en HVDC. La justificación se fundamenta en el costo asociado a mitigar las pérdidas de transmisión y variaciones en la frecuencia de la red, mediante equipos de compensación en subestaciones como lo son los SVC (Static Var Compensator) y los STATCOM (Static Synchronous Compensator). La Figura 2.2 ilustra una comparativa de costos para sistemas de transmisión según longitud de línea, donde para líneas aéreas, a partir de 600 a 700 [km] de longitud el uso de tecnologías HVDC resulta económicamente mejor que las tecnologías HVAC para un similar nivel de potencia de transmisión. La variación súbita en puntos específicos para la inversión en HVAC, corresponde a la incorporación de elementos de compensación en las subestaciones [20].

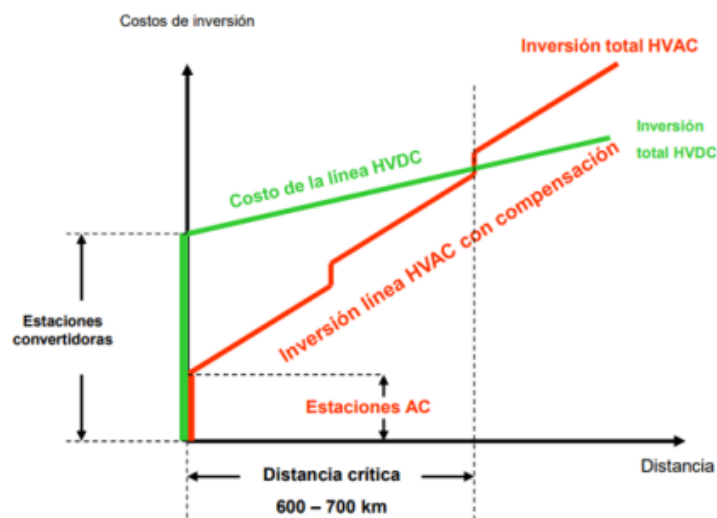


Figura 2.2: Comparativa de costos para sistemas de transmisión según longitud de la línea. [19]

Los proyectos de líneas de transmisión deben definir una franja de seguridad que garantice que no existan peligros para las personas y equipos de la línea. Para una misma capacidad de transmisión, la franja requerida es menor para líneas HVDC. En particular, para proyectos de 3000[MW] se requieren en corriente alterna una franja de 120 metros de ancho, en contraste con los 77 metros promedio que se propone para la línea Kimal-Lo Aguirre [18], [19].

2.3. Aspectos generales de las torres

El proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre contara con un total de 2684 torres. Las torres del proyecto son metálicas, de acero galvanizado y conductores en horizontal. Se emplearan en su mayoría torres atirantadas, al ser idóneas para terrenos planos. Cuando estas no son factibles, se emplearan torres autosoportantes [16].

Las torres atirantadas serán bipolares, con dos arreglos para el DMR y dos cables de guarda de acero galvanizado que incluye fibra óptica (OPGW), cuatro tirantes y mástil central. Las alturas de estas torres variaran de 43 [m] hasta los 71[m]. La Figura 2.3 muestra el diseño típico de estas torres.

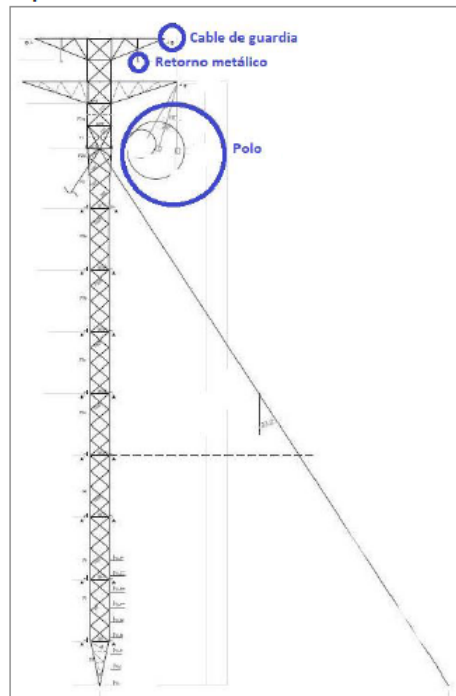


Figura 2.3: Esquema torre atirantada. [16]

Las torres autosoportantes, como la que se muestra en la Figura 2.4 se clasifican en tres tipos [16]:

- **Torres de suspensión:** Empleables solo en zonas de deflexión y su función principal será de soportar los conductores y sus tensiones, en conjuntó al peso de las cadenas de aisladores
- **Torres de remate:** Empleables en zonas de deflexión fuerte (quiebres), es decir para el fin e inicio de la línea. Contienen los esfuerzos desbalanceados de la tensión longitudinal del conductor hacia un solo lado.
- **Torres de anclaje:** Presentes en puntos de deflexión y su principal rol será aguantar los esfuerzos de tensión longitudinal del conductor.

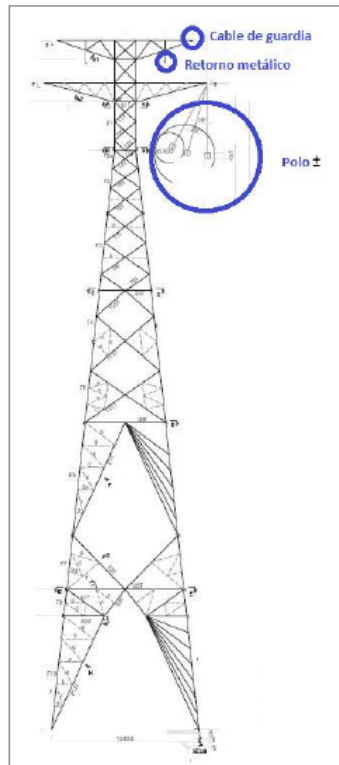


Figura 2.4: Esquema torre autosoportante. [16]

2.4. Operación bipolar y DMR

La línea HVDC Kimal Lo Aguirre, posee dos conjuntos de conductores, un conjunto de polaridad positiva y otro de polaridad negativa. Lo general es emplear una combinación de dos conjuntos mono polares idénticos y aprovechar simetría en la disposición de conductores, cadenas de aislación y en la construcción de torres. En general, la operación bipolar posee retorno por electrodo a tierra en la subestación inversora y en los rectificadores, en menores casos se emplea un retorno metálico dedicado.

El DMR corresponde a un conductor metálico de aislamiento que actúa como retorno o neutro para transportar la corriente entre extremos del sistema. Este conductor reemplaza la función del electrodo a tierra. En el caso del proyecto Kimal-Lo Aguirre su incorporación se determinó a que debido a la imposibilidad de llevar el electrodo a tierra dada la alta resistividad del suelo en la subestación Kimal. El DMR permite otorgar un camino de retorno para la corriente ante la caída de uno de los polos y así, proteger equipos ante eventualidades que den origen a sobrecorrientes a tierra. Un DMR como cable aéreo puede servir como cable de guarda [21].

En el esquema de la Figura 2.5 se entrega un esquema de un sistema HVDC el cual incluye los sistemas de rectificación, inversión, polos de transmisión, DMR, y barras representativas de subestaciones de corriente alterna, las cuales cuentan con elementos de compensación y filtros de frecuencia. Se aprecia en la Figura 2.5 que el DMR está conectado entre neutros de las estaciones conversoras. En particular para la Figura el DMR está tirando a tierra en un único extremo.

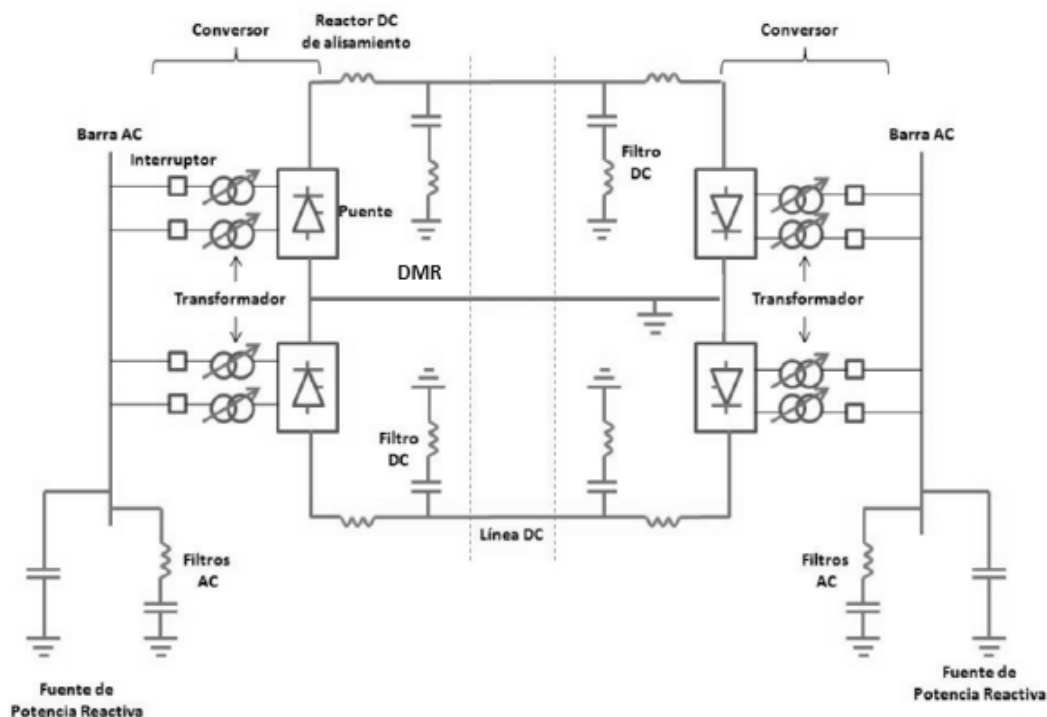


Figura 2.5: Esquema de sistema HVDC bipolar con retorno metálico. [19]

2.5. Respecto al flujo de potencia

Para el año 2030, la matriz energética nacional tendrá cambios respecto a los niveles de demanda y generación energética. En la región Metropolitana se estima para el 20230 una demanda de 36.7[MWh], en tanto para la región de Antofagasta se estima una demanda de 32.2[MWh]. A fin de cumplir con estas estimaciones de consumo y considerando la incorporación de un mayor nivel de generación mediante nuevas centrales generadores de energía renovable. Surge la necesidad de implementar nuevas líneas de transmisión [2].

Mayor detalle de la capacidad actual del SEN se presenta en el anexo B.

En [2] se efectúan simulaciones de flujo de potencia mediante el programa DIgSILENT PowerFactory para el SEN, en base a la proyección de demanda energética para el año 2030. La Figura 2.6 corresponde a la simulación de flujo de potencia con incorporación del proyecto Kimal-Lo Aguirre, en tanto la Figura 2.7 se aprecia la simulación del flujo de potencia con omisión del proyecto. La zona de mayor demanda corresponde a la capital. En la operación sin línea HVDC, las líneas presentes de 500[kV] y 220[kV] terminan operando al límite de su capacidad nominal (más del 80 % de su potencia nominal). De igual forma distintas subestaciones del trazado se encuentran muy cerca del límite técnico de operación de tensión (+/-5 %). Se muestra en la simulación que la incorporación de la línea de corriente continua, mejora las condiciones de transmisión tanto para las generadoras como para las subestaciones AC.

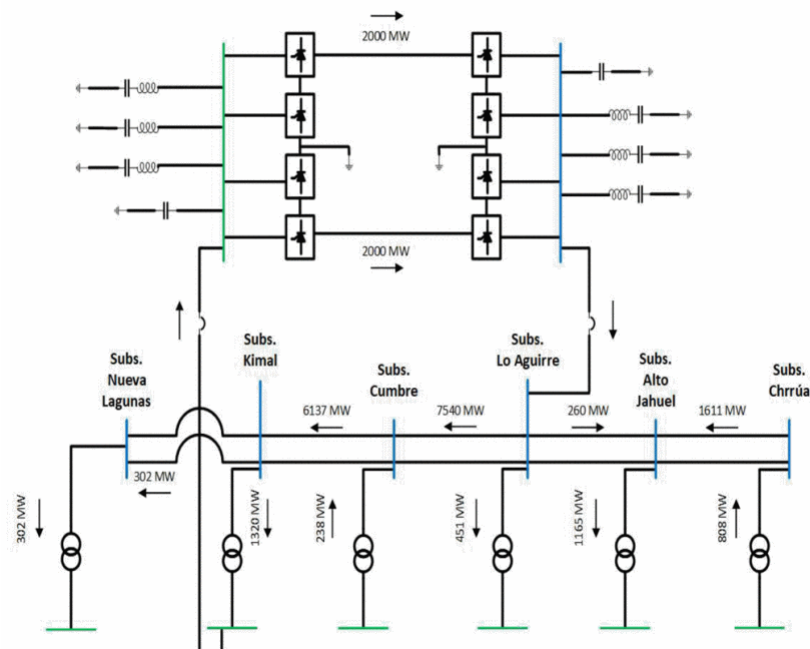


Figura 2.6: Simulación del flujo de potencia 2030 con línea HVDC incorporada. [2]

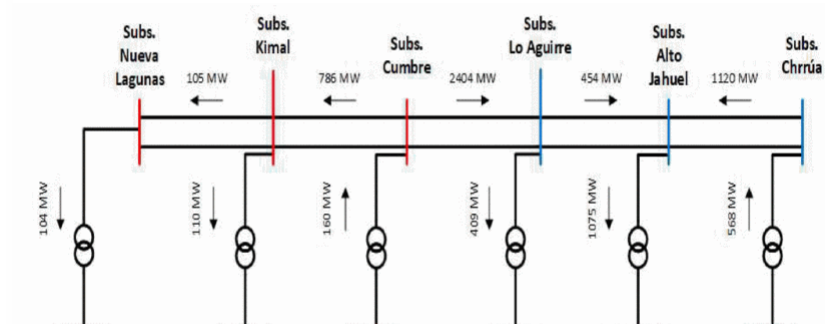


Figura 2.7: Simulación del flujo de potencia 2030 sin línea HVDC incorporada. [2]

Capítulo 3

Detalle de las metodologías.

3.1. Física del rayo

Los rayos son el fenómeno geofísico más impactante y comúnmente experimentado. La aleatoriedad de su ocurrencia en el espacio y el tiempo, junto con la amplia variación temporal, que va desde fracciones de nanosegundos para muchos procesos individuales hasta casi un segundo para la descarga total, y su ocultamiento por la nube de tormenta que los produce, hacen que estudiar los rayos sea especialmente desafiante [22].

Los rayos son descargas eléctricas de origen natural con magnitud de corriente elevada, alta frecuencia, alto ruido y emisión lumínica. Por lo habitual tienen origen de nubes cargadas entre 4 a 7 kilómetros [23].

3.1.1. Respecto a los tipos de descargas atmosféricas

El modelo actual empleado para el entendimiento de una nube electrificada corresponde a la nube tripolar. Una nube tripolar se compone de tres zonas de diferente carga: un núcleo negativo, capa superior positiva y capa inferior positiva (de menor cobertura pero más próxima a la superficie).

La clasificación de los fenómenos de Rayo, entre los cuerpos involucrados es la siguiente:

- Rayo Intranube (intracloud)
- Rayo Entre nubes (intercloud)
- Rayo Nube-Aire (cloud to air)
- Rayo Nube-Tierra (cloud to ground)

Los primeros tres tipos en la literatura pertenecen a las clasificación de descargas de nube, las cuales no son de particular relevancia para este trabajo. Los rayos nube-tierra son las descargas eléctricas atmosféricas (DEAT) de interés para los análisis.

En la Figura 3.1 se observan los cuatros tipos de descargas en listados anteriormente y la naturaleza tripolar la nube con sus respectivas capas [22].

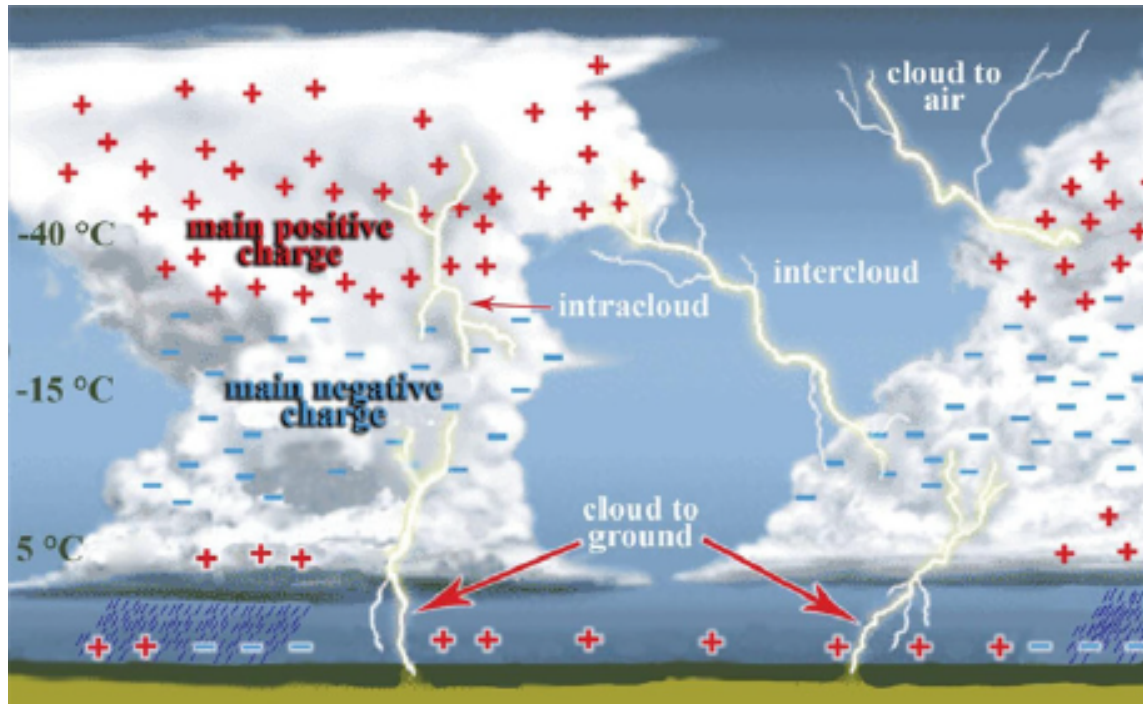


Figura 3.1: Estructura de carga de nubes de tormenta y tipos de descarga. [22]

Existen cuatro tipos de descargas eléctricas atmosféricas para los rayos que ocurren entre la nube y la tierra. Estos se muestran en la Figura 3.2 y se enumeran respectivamente a continuación:

- a) Líder inicial descendente de carga negativa.
- b) Líder inicial ascendente de carga positiva.
- c) Líder inicial descendente de carga positiva.
- d) Líder inicial ascendente de carga negativa.

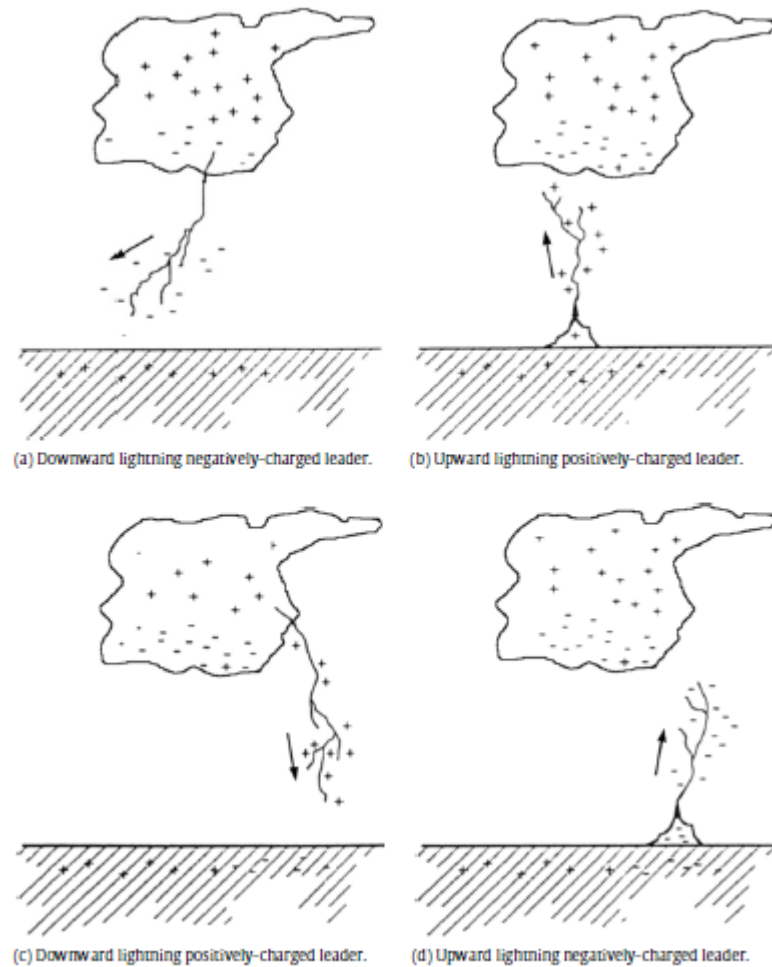


Figura 3.2: Los cuatro tipos de rayos nube-tierra. [22]

Ciertamente, los cuatro tipos se diferencian entre sí según el signo de la carga eléctrica llevada por el líder inicial y la dirección en la que se propaga dicho líder. Alrededor del 90 % de los DEAT nube-tierra son iniciados por un líder con carga negativa que se propaga hacia abajo y aproximadamente un 10 % de los rayos nube-tierra son iniciados por un líder con carga positiva que se propaga hacia abajo. Los otros dos tipos son relativamente poco comunes y ascienden desde las cimas de las montañas, torres elevadas u otros objetos altos, hacia las regiones de carga de la nube. La explicación del termino líder se desarrolla posteriormente en este documento.

3.1.2. Etapas de las descargas

Para la descarga más frecuente nube-tierra, la Figura 3.3 da a conocer las distintas etapas de su formación. Estas en [24] son asignadas como:

- a) Inicio de descarga.
- b) Líder escalonado.

- c) Proceso de enlace
- d) Primera descarga de retorno. *First return strike*
- e) Proceso K-J
- f) Líder dardo
- g) Segunda descarga de retorno y subsecuentes.

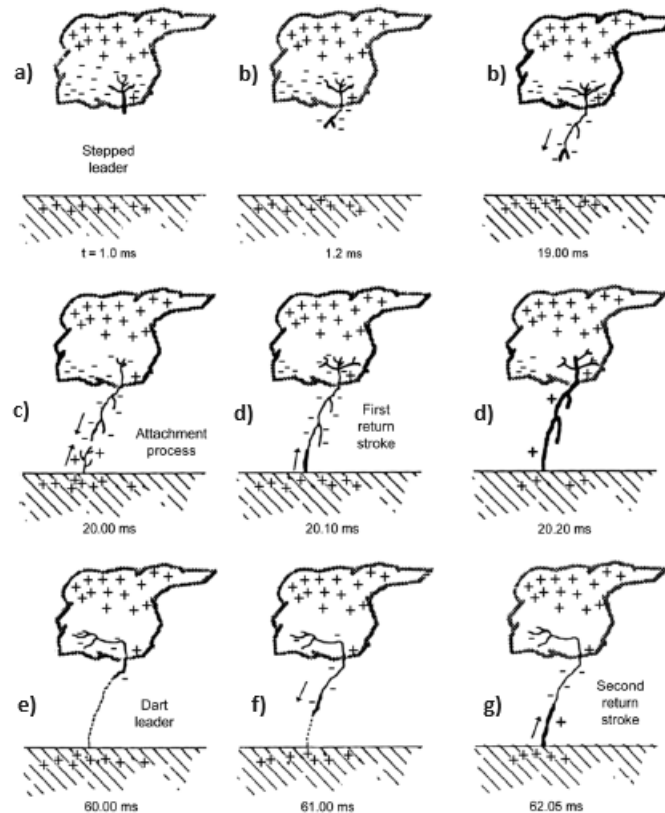


Figura 3.3: Etapas de descarga para rayo nube-tierra negativo. [22] [24]

Para los modelos de este trabajo, solo es requerido abordar íntegramente hasta el proceso de enlace, ilustrado como c) en la Figura 3.3. Sobre los líderes, se considerarán únicamente líderes descendentes negativos y líderes ascendentes positivos.

3.1.3. Inicio de la descarga

El inicio de una DEAT, se debe a la formación de streamers. [25] John y Peter Kuffel definen este término como canales eléctricos de baja energía de forma ramificada o filamentos que se producen ante un elevado campo eléctrico. Estos streamers se forman dentro de la nube y su propagación lleva a la recombinación de carga en la parte baja de la nube y posterior formación de un canal eléctrico, el cual da forma al líder descendente.

3.1.4. Líder escalonado

El líder se compone por un núcleo de plasma altamente conductivo, de alta temperatura y rodeado de envoltura corona. El promedio del radio total para el rayo es de 3[m] [8]. A fin de describir el rayo, el modelo más aceptado es el líder bipolar [26]. En dicho modelo se indica que la propagación de streamers produce un líder de carácter bipolar, ello es, un par de canales de igual magnitud y polaridad opuesta. El canal negativo se extiende hacia el suelo y el positivo se propaga sin tortuosidad en la nube. La Figura 3.4 ilustra la característica bipolar del líder.

En tanto avanza el líder descendente, deja carga espacial positiva adjunta a la punta del último paso del líder, carga que se va acumulando en conjunto al campo eléctrico de la punta negativa. Cuando el campo toma un valor crítico, ocurre disrupción entre las zonas de carga, generando nuevos pasos del líder. [8]

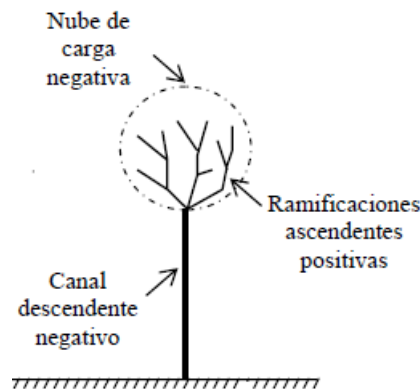


Figura 3.4: Modelo conceptual del canal del líder. [8]

3.1.5. Proceso de enlace

Conforme el líder escalonado se aproxima a tierra, el campo eléctrico en objetos o estructuras cercanas aumenta, especialmente en puntas, esquinas y salientes. Este aumento puede dar lugar a la formación de líderes ascendentes de polaridad opuesta al líder descendente, los cuales se propagan a través del aire para interceptarlo y completar el proceso de conexión. Las etapas y requisitos del proceso de enlace tras la formación del líder escalonado se detallan en los siguientes apartados:

Inicio y propagación de streamers

Como consecuencia del aumento de campo eléctrico de los objetos y/o estructuras a nivel de tierra, se produce una ionización del aire, sobre sectores favorables. Esto conlleva a una avalancha de cargas. Cuando el número de cargas ronda el orden de los cien millones, se produce la formación de los streamers [8].

De los estudios más reconocidos para estimar el campo crítico de inicio de streamers se tiene el trabajo de Peek sobre geometrías cilíndricas coaxiales. Tal trabajo sugiere que el inicio de los streamers se da cuando inicia la actividad corona [27]. La siguiente expresión permite obtener el campo eléctrico crítico:

$$E_c = 3.15 \cdot 10^4 \delta \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (3.1)$$

Donde, E_c es el campo crítico de inicio corona [kV/m], δ densidad relativa del aire [kg/m³] y r_c [m] radio interno del conductor.

Por otro lado, múltiples pruebas de laboratorio y análisis teóricos determinan que el campo eléctrico promedio a lo largo de la extensión de los streamers oscila entre 400 y 500 [kV/m] [28]. Algunos investigadores consideran que ese valor representa el campo mínimo requerido para mantener una propagación estable de los streamers ascendentes.

Evolución de streamers a líderes

Los streamers poseen un canal raíz común llamado tronco stem. Cuando este tronco se ve recorrido por las corrientes del streamer, la temperatura del mismo se eleva, lo que permite aumentar la conductividad del aire a la par de ionización y producción de electrones del tronco. Este proceso transforma al tronco en un canal de alta energía, conductividad y temperatura. A ese nuevo canal se le denomina líder [8].

Una vez que el líder se forma, se generan nuevos streamers positivos desde su punta, extendiéndose hacia la zona donde el campo eléctrico promedio alcanza el nivel mínimo necesario para su propagación. Conforme estos streamers se desarrollan, aumentan la temperatura y la conductividad del nuevo tronco, lo que provoca un alargamiento del canal del líder. Por consiguiente, la propagación del líder está condicionada por la distribución de potencial en la región frente a su punta, conocida como la zona de propagación de los streamers [8].

En [29] se estableció una formula para estimar el voltaje inducido requerido para el inicio y la propagación del líder positivo estable para conductores horizontales:

$$U_c = \frac{2247}{1 + \frac{5.15 - 5.49 \ln(a)}{\ln(\frac{2d}{a})}} \quad (3.2)$$

Donde U_c es la tensión inducida [kV], a [m] radio conductor y d [m] su longitud.

Conexión entre líderes

Basado en [8], la conexión exitosa entre líder ascendente y descendente depende de la distribución de carga, dirección y velocidad; aspectos esenciales de la morfología de líder. Una vez que las puntas de los líderes se conectan se logra el salto final (*final jump* en inglés). En lo que concierne al gradiente se considera preliminarmente que si es superior a 500[kV/m] se da el salto [30].

3.1.6. Primera descarga de retorno

La primera descarga de retorno es el flujo de corriente extremadamente intenso que ocurre cuando un líder descendente de rayo se conecta con una descarga ascendente desde el suelo o de objetos elevados. Este proceso genera una gran cantidad de luminosidad y

calor, alcanzando temperaturas cercanas a 30000 °C. La corriente se desplaza rápidamente por el canal del líder hacia arriba, iluminando el trayecto del rayo y produciendo el trueno. La descarga de retorno se propaga a una velocidad que es aproximadamente un tercio de la velocidad de la luz y causa la expansión rápida del aire, que resulta en el sonido característico del trueno [8].

3.1.7. Proceso J y K

Durante el intervalo entre el final de la primera descarga de retorno y el inicio del líder dardo, se producen variaciones rápidas en el campo eléctrico conocidas como procesos J y K. El proceso J indica cambios rápidos en el campo eléctrico que reflejan la acumulación de carga adicional en el canal del rayo. El proceso K, por otro lado, es caracterizado por una fluctuación abrupta y significativa en el campo eléctrico, señalando la reactivación del canal del rayo para una nueva DEAT [8], [31].

3.1.8. Líder dardo

El líder dardo es un tipo de líder que se mueve suavemente hacia abajo a lo largo del canal de un rayo ya establecido, en lugar de hacerlo en segmentos intermitentes como el líder escalonado. Este líder deposita carga negativa a lo largo de su trayecto, pero a una velocidad menor. Los rayos subsecuentes producidos por líderes dardo generalmente tienen corrientes y cargas menores en comparación con la primera descarga de retorno. A menudo, los líderes dardo son responsables de los rayos subsiguientes y presentan menos ramificación que el líder escalonado, resultando en descargas menos brillantes pero aún significativas [8].

3.1.9. Descargas subsecuentes

Estas se originan cuando un líder dardo desciende por el canal del rayo principal, depositando carga negativa en el trayecto ya establecido. Estas descargas subsecuentes tienen corrientes y cargas menores en comparación con la primera descarga, y suelen ocurrir con intervalos de 40 a 50 ms. Aunque son menos intensas, pueden ser varias y contribuyen a la transferencia total de carga del rayo desde la nube hacia el suelo [8].

3.1.10. Morfología del líder ascendente ante impulsos

El comportamiento del líder ascendente varía dependiendo de las condiciones en las que el mismo emerge, como lo es la tensión. Se han efectuado estudios utilizando voltaje en DC sobre conductores, a fin de ver la influencia de la tensión en la formación del líder ascendente [32].

En la Figura 3.5 se aprecia el montaje de un experimento, consistente en una separación entre una placa/varilla y un conductor, donde se podía aplicar un voltaje de corriente continua al conductor y un voltaje de impulso negativo en el electrodo de la placa/varilla (impulso negativo de tensión con tiempos de 200/2000 μs). Tras registrar el comportamiento del líder ascendente a una tensión DC constante, se procedió a evaluar con diferentes niveles de potencial DC, que van desde los 0[kV] hasta los 800[kV] y con diferente valor de peak de tensión del impulso. La Tabla 3.1 (adaptada de [32]) indica los resultados promedios del experimento.

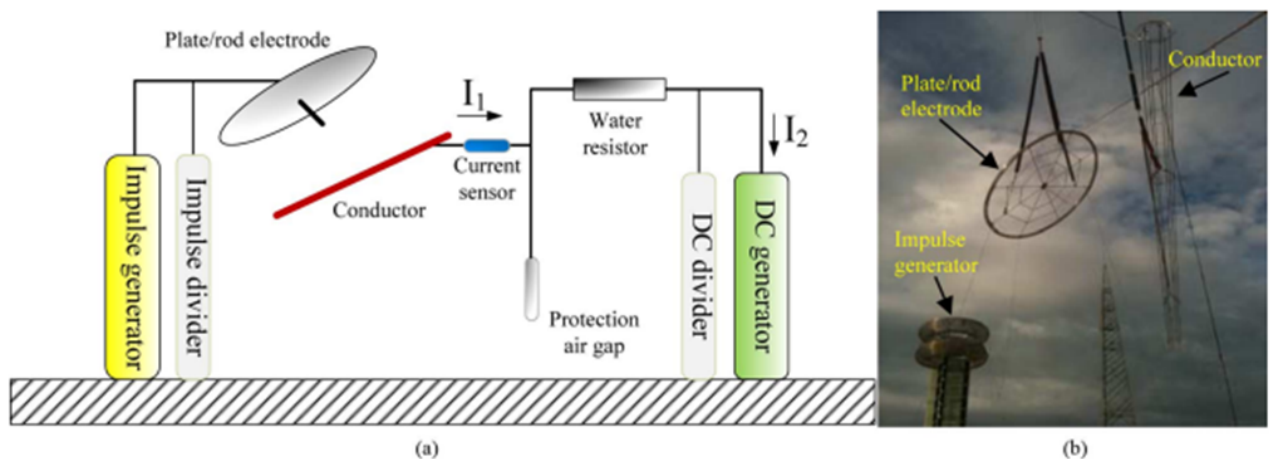


Fig. 1. Diagram of the experiment: (a) Setup of the experimental system and (b) the arrangement of the high-voltage electrode and the conductor in the test yard.

Figura 3.5: Diagrama y montaje del experimento de impulsos sobre conductor DC. [32]

Nivel de tensión DC aplicada al conductor [kV]	Tensión de impulso $U_{-}\{i\}$ [Kv]	Inicio del streamer [μs]	Inicio del líder discontinuo	Inicio del líder continuo
800	2019.6(1.15 $U_{-}\{50\}$)	12.1	42.7	75.2
	2138.4	11.91	44.7	52.7
	2257.2	11.7	42.7	47.7
	2376	11.6	40.2	42.2
	2494.8(1.15 $U_{-}\{50\}$)	21.5	56.1	93.6
500	2613.6	21.2	58	78
	2732.4	20.9	56.3	72.3
	3207.6(1.15 $U_{-}\{50\}$)	35.9	106.9	114.1
0	3326.4	34.5	100.5	112.5

Tabla 3.1: Tiempos de inicio del streamer y líder ascendente para diferentes tensiones aplicadas. [32]

Los resultados experimentales indicaron que el líder ascendente se desarrollará con mayor rapidez y podría extenderse por más tiempo en cuanto mayor sea el voltaje de corriente continua. En otras palabras, la probabilidad de que el rayo impacte al conductor, es mayor cuando el voltaje del mismo tiene una polaridad opuesta al rayo descendente.

Para apoyar tal hipótesis, el estudio realizado sobre líneas de transmisión bipolares HVDC en el sur de China detalla rayos que impactaron sobre las líneas Tian-Guang

y Gui-Guang de 500[kV] para el periodo 2003-2006 [32]. En la Tabla 3.2 se muestran los resultados del estudio. Los autores resaltan que de cada 8 impactos en la línea, de estos, 7 serán impactos sobre el polo positivo.

Línea de transmisión	N° Torre	Polaridad	Fecha
+/-500 [kV] Tian-Guang	2067	Positiva	23.8.2003
	1867	Positiva	11.8.2004
	1876	Positiva	11.8.2004
	1892	Positiva	19.9.2004
	Inexacta	Positiva	21.9.2004
	1882	Positiva	2.6.2006
+/-500[kV] Gui-Guang	1649	Negativa	4.5.2005
	1767	Positiva	6.16.2006

Tabla 3.2: Datos de interrupciones de rayos para el sur de China. [32]

En [33] se expanden los ensayos para otros niveles de tensión DC, y sugieren que los aspectos en la formación del líder ascendente son apreciables a partir de los 500[kV]. En la Figura 3.6 se muestra que el tiempo de formación del líder continuo (eje vertical), varía según el nivel de tensión de red (eje horizontal). El uso del MEG queda sobrestimado al obviar los aspectos morfológicos del líder ascendente, por ello los autores sugieren emplear el MLP.

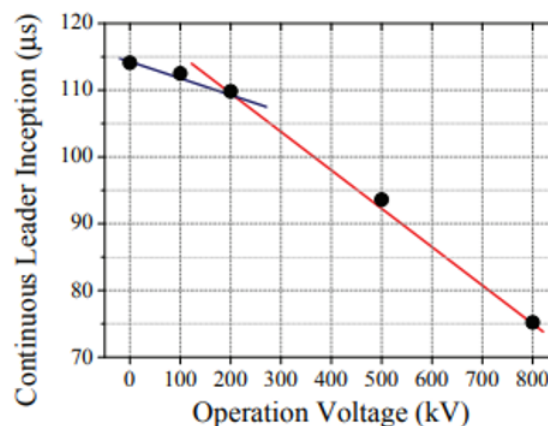


Figura 3.6: Inicio del líder estable según tensión de línea DC. [33]

Respecto a ensayos con corriente alterna en [34], se aplica para una línea, tensiones de 110, 220, 500 y 1000[kV], procediendo a aplicar el impulso para distintivos ángulos de fase. A mayor amplitud obtuvieron menores tiempos de formación para el streamer y para el líder ascendente (inestable y estable/continuo). En [35], se repite el ensayo de impulso tipo rayo aplicado a un electrodo punta-placa a fin de analizar, el comportamiento del líder ascendente proveniente de un cable conductor energizado y de un conductor similar aun cable de guarda. En ese estudio se aplicó tensión sinusoidal de 110, 220, 500 y 1000[kV] con impulso 3042[kV] peak y tiempos de 200 \ 2000 [μs]. La Figura 3.7 muestra el montaje del experimento de impulsos sobre los conductores AC y aterrizados.

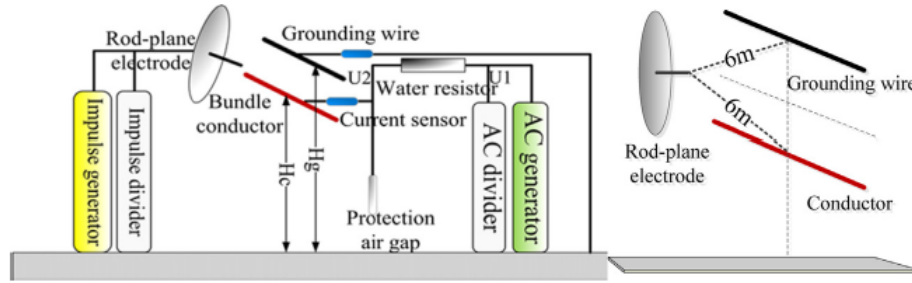


Figura 3.7: Diagrama del experimento de impulsos sobre conductores AC y aterrizados. [35]

En el experimento de [35], se aplicó el impulso, cuando la tensión sinusoidal en el conductor tenía ángulos de 0° , 30° , 60° y 90° . Además el ángulo de protección del cable a tierra se fijó en 0° (paralelo al conductor), lo que no es una configuración habitual.

Estos resultados fueron comparados, con los ensayos efectuados en [34], a fin de determinar el impacto del conductor similar a un cable de guarda en la morfología del líder ascendente. De la comparación los autores concluyen que la presencia de un conductor dispuesto similarmente a un cable de guarda, debilita la formación de los líderes ascendentes. Cuando la tensión a la que se somete el conductor energizado es mayor, los streamers y líderes provenientes de este, se forman más rápido. Caso contrario para los streamers y líderes emergentes de los conductores empleados como cable de guarda.

3.2. Modelo electro-geométrico

El fundamento bajo el que se desarrollan los MEG, parte del proceso de enlace de rayo con estructuras en tierra. El concepto principal para la aplicación de los MEG es la distancia de impacto (striking distance), la cual corresponde a la distancia existente entre líder descendente y objeto de impacto en la que se presenta el campo eléctrico que es requerido para causar disrupción del aire [36]. Este campo se manifiesta en el momento en que el gradiente del potencial medio en el espacio comprendido entre la punta del líder descendente y la estructura alcanzada se iguala con el gradiente del potencial de los streamers. Para el MEG se considera que la distancia de impacto aparece en el instante en que nace el líder ascendente [5].

Mediante el valor de corriente máxima de descarga se establece la siguiente relación para la distancia de impacto:

$$S(I_1) = AI_1^B \quad (3.3)$$

Donde S representa la distancia de impacto [m], I_1 denota la corriente máxima en la descarga [kA]. A y B representan coeficientes empíricos determinados según el punto de terminación del rayo y la magnitud de la corriente de la descarga. Los valores estipulados por las normas internacionales son $A=10$ y $B=0.65$ [37].

Además, la distancia S puede expresarse en términos de la distancia crítica a tierra, S_g [m], definida por la siguiente expresión:

$$S(I_1) = \gamma S_g(I_1) \quad (3.4)$$

El coeficiente γ indica qué tan atractiva es la tierra en comparación con las estructuras, cuando se enfrentan a la presencia de un rayo. Para un conductor sin apantallar, el MEG se basa en obtener el punto de impacto de una distancia dada una corriente I .

3.2.1. Aplicación sobre líneas

Los siguientes pasos corresponden a la metodología estándar indicados en [5] de aplicación de MEG para líneas de transmisión.

- Para una corriente específica, I [kA], se calculan las distancias de impacto al conductor y al terreno, S y S_g , respectivamente.
- Se traza una línea paralela al nivel del terreno, a una distancia S_g del suelo.
- Se delinea una semicircunferencia de radio S , con centro en el conductor y que interseca la línea trazada en el paso anterior en dos puntos.

La Figura 3.8 muestra la aplicación del MEG en un único conductor.

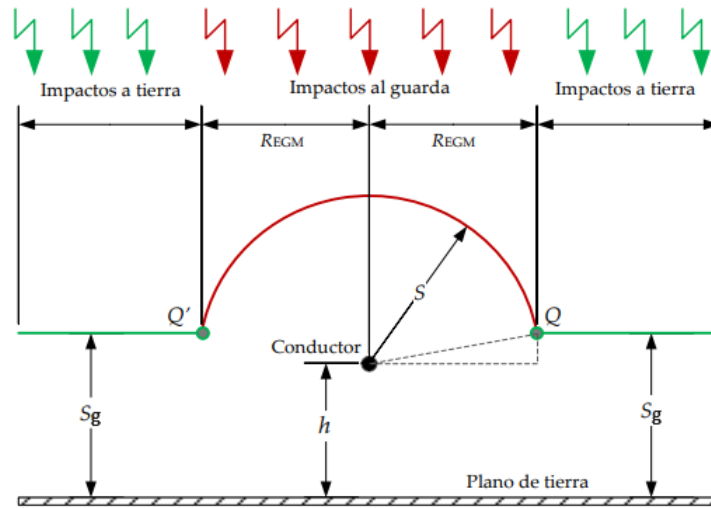


Figura 3.8: Aplicación de los MEG para un solo conductor sin apantallar. [5]

En la Figura 3.8 se aprecia que la semicircunferencia y la línea paralela al plano de tierra, generan un arco de blindaje $Q'Q$. Si el rayo vertical intercepa dicho arco, se considera un impacto al conductor, en tanto si cae fuera, impacta a tierra. Para definir la sección horizontal de impacto, se define la distancia lateral atractiva (R_{EGM} en la Figura 3.8), la cual corresponde a la mayor distancia horizontal medida desde un cuerpo de tierra a la que espera que ocurra el enlace de rayo [37]. La ecuación que representa la distancia lateral atractiva es la siguiente:

$$R_{EGM} = \begin{cases} \sqrt{(1 - \frac{1}{\gamma^2})S^2 + \frac{2h}{\gamma}S - h^2}, & S_g > h \\ S, & S, S_g \leq h \end{cases} \quad (3.5)$$

Para ejemplificar el MEG para una línea monofásica (o mono-polar) apantallada, en [5] se otorga el siguiente esquema:

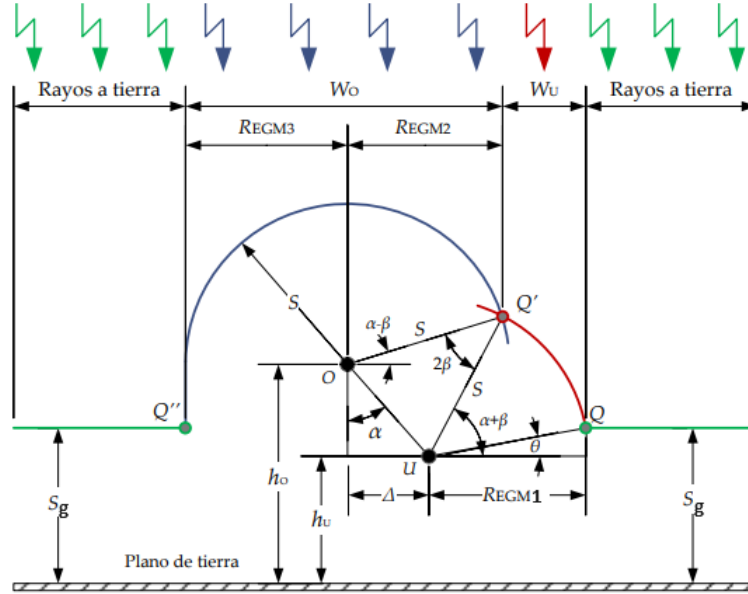


Figura 3.9: Aplicación del MEG para un solo conductor apantallado, definición de ángulos y distancias. [5]

Donde, para la Figura 3.9 los puntos O y U , corresponden al cable de guarda OPWG y al conductor del polo (o fase en caso AC) respectivamente. Con alturas respectivas medidas desde el suelo h_o [m] y h_u [m]. La separación horizontal entre el conductor de polo y el cable de guarda se define como Δ [m] y α es el ángulo de apantallamiento en grados.

Respecto al arco, cuando el líder descendente se aproxima a la línea se forman sendos líderes ascendentes de los cables de guarda y de polo con su respectivo radio de atracción, El modelo electro-geométrico tradicional considera que ambos radios son iguales (distancia S) [5].

El arco $Q'-Q$ es el arco expuesto (*exposed arc*), si un rayo lo intercepta, se genera impacto en el conductor del polo. Si un rayo impacta al arco de blindaje $Q'-Q''$ (*shielding arc*), el impacto dará al guarda. El resto corresponderán a descargas a tierra.

En el estudio observa que, debido a la posición del cable de guarda por encima del conductor de polo, se produce un solapamiento entre las distancias laterales atractivas (en metros), R_{EGM1} (distancia lateral atractiva del polo) y R_{EGM2} , R_{EGM3} es la distancia lateral atractiva del cable de guarda.

Para MEG se consideran únicamente descargas verticales. Si un rayo incide sobre los anchos expuestos, que son secciones horizontales paralelas al plano de tierra y representativas de los arcos respectivos, se tienen las siguientes expresiones que indican las probabilidad de impacto sobre el cable de guarda P_o y el polo P_u :

$$P_o = \frac{W_o}{W_o + W_u} \quad (3.6)$$

$$P_u = \frac{W_u}{W_u + W_o} \quad (3.7)$$

Con W_o [m] y W_u [m] los anchos expuestos del cable de guarda y del conductor de polo, respectivamente. A partir de la geometría mostrada en la Figura 3.9 se pueden derivar las siguientes expresiones [5].

$$W_o = R_{EGM2} + R_{EGM3} \quad (3.8)$$

$$W_u = R_{EGM1} - R_{EGM2} + \Delta \quad (3.9)$$

$$R_{EGM1} = \begin{cases} S \cos \theta, & S_g > h_u \\ S, & S_g \leq h_u \end{cases} \quad (3.10)$$

$$R_{EGM2} = \Delta + S \cos(\alpha + \beta) = S \cos(\alpha - \beta) \quad (3.11)$$

$$R_{EGM3} = \begin{cases} \sqrt{S^2 - (S_g - h_o)^2}, & S_g > h_o \\ S, & S_g \leq h_o \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{S_g - h_u}{S} \right) \quad (3.13)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (h_o - h_u)^2}} \right) \quad (3.14)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\Delta^2 + (h_o - h_u)^2}}{2S} \right) \quad (3.15)$$

De estas ecuaciones se aprecia que los anchos expuestos del cable de guarda y del conductor de polo W_u y W_o , respectivamente se componen de las distancias laterales atractivas $R_{EGM1,2,3}$ y la distancia horizontal entre conductores δ . Las distancias laterales atractivas dependen de las alturas de los conductores, los ángulos que forman entre estos y con puntos de intersección de los arcos y la distancia horizontal entre conductores δ .

3.2.2. Corriente máxima de falla de apantallamiento

Las distancias S y S_g incrementan al aumentar el valor peak de corriente del rayo, de esta forma el valor del ancho W_u disminuye hasta volverse nulo con el arco expuesto. De esta forma se define la corriente máxima de apantallamiento como el valor máximo en el que existe probabilidad de impactar el rayo sobre el polo. En la Figura 3.10, se establecen

relaciones geométricas en base a la corriente máxima, cuando el arco Q-Q' ilustrado en la Figura 3.9 se hace nulo.

$$R_{EGMmax} = \begin{cases} \sqrt{S_{max}^2 - (S_{Gmax} - h_o)^2}, & S_{Gmax} > h_o \\ S_{max}, & S_{Gmax} \leq h_o \end{cases} \quad (3.16)$$

$$W_{omax} = 2R_{EGMmax} \quad (3.17)$$

$$S_{Gmax} = \frac{h_o + h_u}{2k_o} \left(1 + \sqrt{1 - k_o \left(1 + \frac{\Delta}{h_o + h_u} \right)^2} \right) \quad (3.18)$$

$$k_o = 1 - (\gamma \sin \alpha)^2$$

Donde E_{EGMmax} [m] es la distancia lateral atractiva del cable de guarda ante rayo de máxima corriente. De ello que su ancho expuesto W_{omax} [m], corresponde a dos distancias laterales atractivas. De igual manera se obtiene la expresión de distancia máxima de impacto a tierra S_{gmax} [m] [5].

Finalmente para la corriente máxima I_{max} [kA] obedece la siguiente relación [5]:

$$I_{max} = \left(\frac{\gamma S_{Gmax}}{A} \right)^{1/B} \quad (3.19)$$

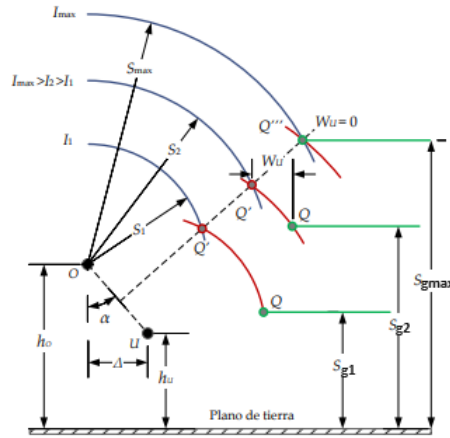


Figura 3.10: Definición de la corriente máxima de falla de apantallamiento. [5]

3.2.3. Ángulo de apantallamiento perfecto

El ángulo de apantallamiento perfecto se alcanza cuando la corriente crítica y la corriente máxima de falla de apantallamiento son idénticas. Esto implica que este ángulo garantizará la prevención absoluta de la salida de la línea debido a fallas de apantallamiento [5]. La corriente crítica I_{crit} [kA] es el valor de corriente mínima que se requiere para causar flameo se determina a partir de la impedancia del conductor de polo Z_u [Ohm] y la tensión crítica de flameo ante impulso de la cadena de aisladores U_{crit} [kV]. Tradicionalmente se emplea la ecuación (3.20).

$$I_{crit} = \frac{2U_{crit}}{Z_u} \quad (3.20)$$

En tanto, el ángulo de apantallamiento perfecto en grados, se obtiene mediante la ecuación (3.21) [38].

$$\alpha_{perf} = 0.5 \left(\arcsin \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{h_o}{AI_{crit}^B} \right) + \arcsin \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{h_u}{AI_{crit}^B} \right) \right) \quad (3.21)$$

3.2.4. Evaluación de las tasas de falla de apantallamiento

La tasa de falla de apantallamiento de una línea, dada una corriente de retorno específica (*shielding failure rate-SFR*), se define como el número de rayos con una corriente I que impactan sobre los polos anualmente tal como se detalla en la ecuación (3.22). El SFR se mide en [impactos de rayo/año] [5]:

$$SFR_1(I) = 2 \cdot GFD \cdot L \cdot f_1(I) \frac{W_u}{1000} \quad (3.22)$$

Donde L es el largo [km] de la línea, W_u es el ancho expuesto del polo [m], GFD es la densidad de rayos a tierra en la localización de la línea. Por último $f_1(I)$ [-] corresponde a una función de densidad de probabilidad de que la primera descarga de retorno tenga un valor de corriente dado.

$$f_1(I) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln(I)}I} \right) e^{-\frac{(\ln I/\bar{I})^2}{2\sigma_{\ln(I)}^2}} \quad (3.23)$$

La función de densidad depende de la desviación estándar del logaritmo natural de la corriente ($\sigma_{\ln(I)}$). Además, $\bar{I}$ es el promedio de la corriente de retorno de primera descarga. En la Tabla 3.3 se indican los valores adoptados por la IEEE para tales parámetros [37].

Parámetros	$I < 20[\text{kA}]$	$I > 20[\text{kA}]$
$\sigma_{\ln(I)}$	1.33	0.605
$\bar{I}$	61	33.3

Tabla 3.3: Parámetros estadísticos para la primera descarga.

Para expresar la tasa total de falla por apantallamiento [impactos de rayo/año] (SFR_1) para el espectro de corrientes de rayo de interés se tiene la siguiente relación [5]:

$$SFR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) dI \quad (3.24)$$

Su forma estandarizada (SFR_{st}) [impactos de rayo/(año·100km)]es:

$$SFR_{st} = \frac{2 \cdot GFD}{10} \cdot \int_{I_{min}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (3.25)$$

Donde, I_{min} [kA] es el valor mínimo de corriente que es capaz de generar unión de lideres en las descargas atmosféricas. Según [38], se considerará para aplicar el MEG una corriente de 2[kA] [38]. La corriente I_{max} [kA] corresponde al valor de corriente ya definido en la Sección 3.2.2.

La tasa anual de flameo por fallas de apantallamiento (*Shielding Failure Flashover Rate* - *SFFOR*) [39], es obtenible al reemplazar el valor mínimo de corriente de la ecuación (3.24) por la corriente crítica de flameo I_{crit} [kA]. Esta tasa corresponde al número de impactos anuales que dan en el polo y causara flameo de la cadena de aisladores. El SFFOR se mide en [flameos por impactos de rayo/año] y se presenta en la ecuación (3.26) [5]

$$SFFOR_1 = \frac{2}{1000} \cdot GFD \cdot L \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) dI \quad (3.26)$$

Donde, la corriente crítica I_{crit} corresponde a la ecuación 3.27.

$$I_{crit} = \frac{2(U_{crit})}{Z_u} \quad (3.27)$$

La impedancia característica Z_u [Ω] se obtiene mediante la siguiente relación [40]:

$$Z_u = 60 \ln \frac{R_c}{r_c} \quad (3.28)$$

Con r_c [m] radio conductor y R_c [m] radio corona del conductor; con valor aproximado de dos veces la altura promedio de conductores [41].

La forma normalizada del SFFOR, es decir la tasa anual de flameo por falla de apantallamiento por cada 100[km] de línea, se obtiene multiplicando la expresión (3.26) por 100 y dividiendo en la longitud del trazado de la línea L [km]. Las unidades de esta tasa estandarizada son [flameos por impacto de rayo/(100km año)] y se presenta en la ecuación (3.29) [39].

$$SFFOR_{st} = \frac{2 \cdot GFD}{10} \cdot \int_{I_{crit}}^{I_{max}} W_u \cdot f_1(I) \cdot dI \quad (3.29)$$

3.2.5. Aplicación del modelo electro-geométrico para líneas HVAC

Para la transmisión mediante corriente alterna, esta se efectúa mediante líneas trifásicas, por lo que, como mínimo existirán tres conductores en operación, incrementando el numero de arcos presentes para el análisis.

En 3.11, se toma como referencia para el caso de línea trifásica apantallada la Figura.

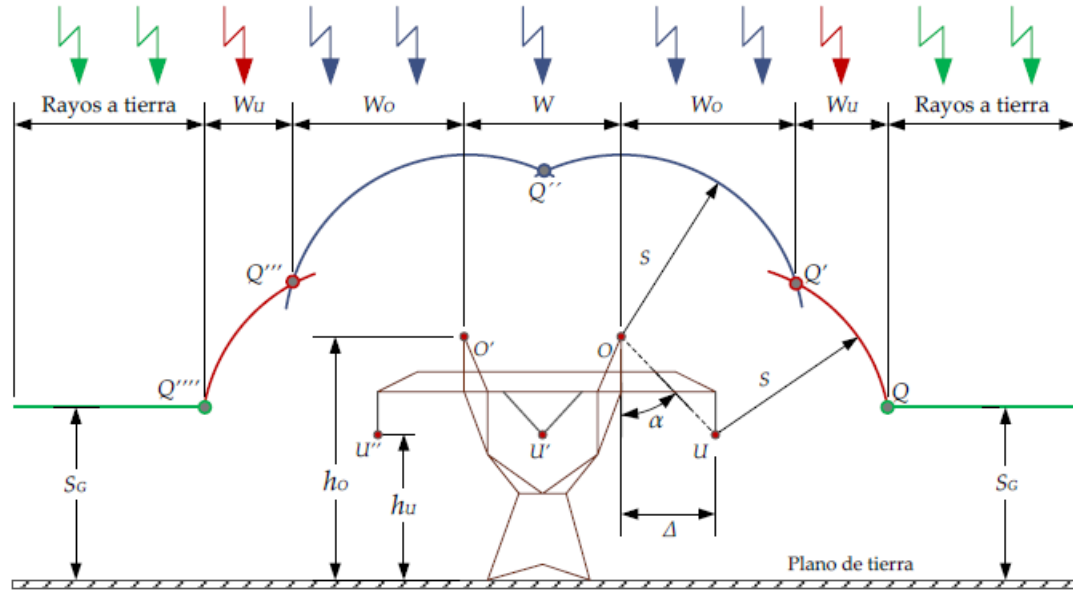


Figura 3.11: Modelo de una Línea de transmisión trifásica apantallada. [5]

Para la ilustración, se consideran arcos con los centros en los conductores de las tres fases de la línea (U, U', U'') y en los 2 cables de guarda (O, O'), con radio S dependiente de la corriente de rayo y la paralela a la línea de suelo a una distancia S_g . Se identifican un par de arcos expuestos entre los puntos Q''' con Q'' y Q' con Q y un par de arcos blindados entre los puntos Q''' con Q'' y Q'' con Q' . Como el modelo considera un descenso de rayo vertical, es posible identificar anchos según arco para los conductores. Los anchos W_u corresponden a las secciones horizontales expuestas pertenecientes a los arcos de las fases extremas y el ancho W_o , lo es para los cables de guarda. Adicionalmente se identifica la distancia entre cables de guarda W [m].

Ante el rayo vertical y con los anchos identificados para la línea, se obtienen las probabilidades de impacto sobre las fases P_u y los guarda P_o .

$$P_u = \frac{2W_u + W}{2W_u + 2W_o + W} = \frac{W_u + 0.5W}{W_u + W_o + 0.5W} \quad (3.30)$$

$$P_o = \frac{2W_o + W}{2W_u + 2W_o + W} = \frac{W_o + 0.5W}{W_u + W_o + 0.5W} \quad (3.31)$$

Es frecuente que en sistemas trifásicos, al emplear más de un cable de guarda a misma altura, por medio de una distancia apropiada de separación entre estos W [m], se obtenga un apantallamiento efectivo de la fase central. Las descargas eléctricas atmosféricas no impactaran en el conductor central por lo que las tasas de flameo y falla de apantallamiento son nulas.

3.3. Modelo de líder progresivo

El modelo de líder progresivo principalmente desarrolla paso a paso la formación del rayo de forma tridimensional, y evalúa el campo eléctrico entre la punta del líder descendente con el espacio. Ante la bajada del líder del interior de la nube a la tierra, se evalúa el origen y la propagación directa del líder ascendente continuo desde objetos de la superficie. Cuando la magnitud del campo eléctrico entre las puntas de los líderes, supera el valor crítico de ruptura dieléctrica del aire, se produce la unión entre los líderes y por ende la DEAT al cuerpo [41].

Para el modelo, las principales características del líder descendente son la tortuosidad y la ramificación [8].

- a) La **tortuosidad** es de carácter aleatorio y se forma consecutivamente en cada paso del líder escalonado hasta completar su trayecto. Se utilizan coordenadas esféricas siguiendo las pautas establecidas en [8] para ejecutar el MLP. La Figura 3.12 ilustra las coordenadas empleadas en la modelación de pasos.

 - La coordenada ϕ representa el cambio de dirección del canal tortuoso respecto a la vertical. El cambio fue descrito mediante distribución Gausianna con media de 180° con desviación estándar ajustada a fin de tener cambio de dirección media de 17°
 - La coordenada ρ representa el largo del paso del líder descendente, con longitud conocida entre 10 a 100[m] [42].
 - La coordenada θ varia en 360° , por lo que describe por medio de distribución uniforme.

- b) La **ramificación**, respecto al trabajo de Vargas [8], se cuenta con un ángulo típico de ramificaciones de 45° respecto a la vertical, manifestándose de 2 a 3 ramas para el 50 % de la muestra de rayos. Para el modelo las ramas se generaran aleatoriamente considerando propagación de 45° y con longitud de paso entre 10 a 50 [m].

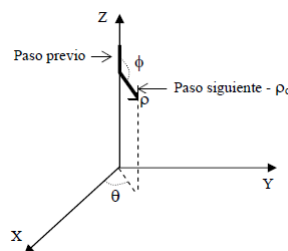


Figura 3.12: Esquema de formación de pasos de líder. [42]

3.3.1. Modelo líder descendente

La carga eléctrica contenida en el líder obedece a tener mayor densidad de carga en la punta y menor en la zona baja de la nube de tormenta. Cada paso (etapa) del líder se modela por medio de cargas lineales y la punta se modela de forma semiesférica con radio. Esto se ilustra en la Figura 3.13.

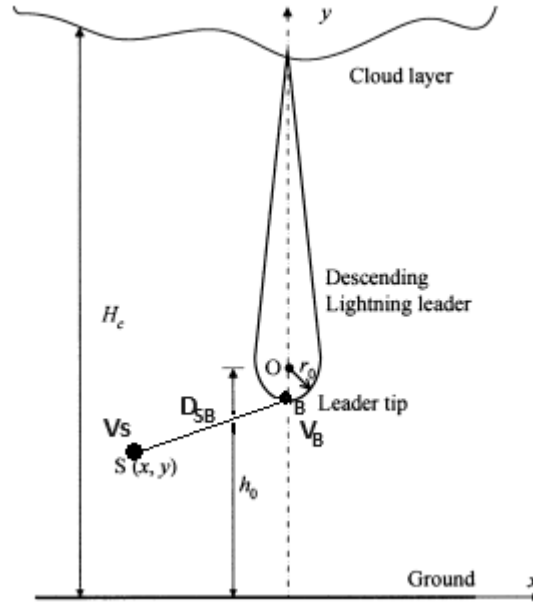


Figura 3.13: Líder descendente. [43]

La relación entre carga total Q_T [C] dentro del líder y la corriente de rayo es [43]:

$$Q_T = \left(\frac{I}{25} \right)^{\frac{1}{0.7}} \quad (3.32)$$

La carga en cada paso del líder Q_i [C] se define mediante [44]:

$$Q_i = \frac{1}{\sum C_i} C_i Q_T \quad (3.33)$$

Donde, $C_i = \ln \left(\frac{H_c}{h_i} \right)$, con H_c es la altura de la nube [m] y h_i [m] es el promedio entre el punto más bajo (h_{min}) y el punto más alto (h_{max}) del paso del líder [44].

$$h_i = \frac{h_{min} + h_{max}}{2} \quad (3.34)$$

La carga dentro de la punta del líder Q_o [C] viene dada por [43]:

$$Q_o = 2\pi\epsilon r_o^2 E_C \quad (3.35)$$

Donde ϵ es la constante dieléctrica del aire y E_C campo eléctrico crítico de ruptura. Para el radio R_o [m] se considerará la siguiente relación en función de la corriente cresta del rayo en [kA] [45]:

$$R_o = 3 \log(I + 20) \quad (3.36)$$

Estimadas tanto la carga del paso del rayo Q_i y la carga dentro de la punta del líder negativo Q_o , se procede a calcular tensión la inducida V_s en los puntos del espacio. En la

Figura 3.13, corresponde a la tensión inducida en el punto S. Simulando el efecto de tierra por medio de cargas imágenes, se obtienen las siguientes relaciones [43].

$$V_S = -\frac{-2Q}{4\pi\epsilon(H_c - h_o^2)} \int_{h_o}^{H_c} (H_c - h) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) dh - \frac{Q_o}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (3.37)$$

$$r1 = \sqrt{(y - h)^2 + x^2}$$

$$r2 = \sqrt{(y + h)^2 + x^2}$$

$$r3 = \sqrt{(h_o - h)^2 + x^2}$$

$$r4 = \sqrt{(h_o + h)^2 + x^2}$$

Para la tensión V_B en la punta del líder, ubicada, en la Figura 3.13 en el punto B del líder descendente se tiene [43]:

$$V_B = \frac{-Q}{2\pi\epsilon(H_c - h_o)^2} \left[(H_c - h_o + r_o) \ln\left(\frac{H_c - h_o - r_o}{r_o}\right) - (H_c + h_o - r_o) \ln\left(\frac{H_c + h_o - r_o}{2h_o - r_o}\right) \right] - \frac{Qr_o}{12\epsilon(H_c - h_o)} \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{2h_o - r_o} \right) \quad (3.38)$$

3.3.2. Origen del líder ascendente

Para el inicio del líder ascendente continuo y estable en un punto del espacio, se emplea el criterio de la tensión inducida crítica de Rizk para conductores horizontales [29]. Esto se cumple cuando la tensión inducida V_s supera la tensión de Rizk presentada en la ecuación (3.2)

3.3.3. Unión de los líderes

Para el MLP, cuando se propague el líder emergente de un conductor, se traza entorno al punto de espacio de origen del líder, una circunferencia representativa del gap típico presente entre líderes al unirse. Para este modelo se considerará un radio de 10[m] [9]. La unión posterior al trazado del gap se evalúa mediante el campo eléctrico [kV/m], cuando el campo entre las puntas de los líderes supera los 500[kV/m] se dará la DEAT, En este sentido el criterio de unión se es evaluado mediante la ecuación de campo eléctrico [kV/m] (3.39). Su análisis detallado se muestra en la Figura 3.14.

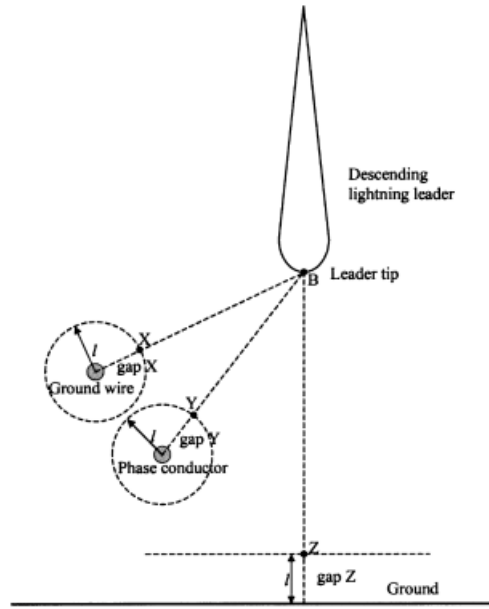


Figura 3.14: Evaluación del criterio de unión líderes. [41]

$$E_{SB} = \frac{V_S - V_B}{D_{SB}} \quad (3.39)$$

Donde, $D_{SB}[\text{m}]$ es la distancia entre los puntos S y B acorde a la Figura 3.13.

3.3.4. Evaluación de las tasas de falla de apantallamiento

Por cada líder descendente trazado, se evalúa la carga eléctrica en cada uno de sus pasos. Conforme sea obtenida la matriz espacial que representa las líneas del sistema de transmisión y la carga eléctrica, se evalúa en cada paso del líder, si se cumple el inicio del líder ascendente en un punto del espacio. La formación del líder ascendente se asume estable y continuo debido al criterio de tensión de Rizk. Detalles de la representación matricial del sistema de transmisión pueden encontrarse en el D.

Tras evaluar la posibilidad de impacto para toda la matriz representativa de la línea y para cada uno de los pasos que describen la trayectoria del líder descendente, se repite el proceso, pero incrementando la corriente, con mismo el punto de origen del rayo. Este permite obtener el rango de corrientes que producen impactos sobre los conductores de polos de la línea [41].

Es necesario definir la función de densidad de probabilidad de la corriente de rayo para la estimación de las tasas. En este estudio se realiza este cálculo en base a la ecuación 3.40 [44]:

$$P(I) = 10^{0.05 - \frac{I}{74}} \quad (3.40)$$

Las tasas de falla SFR Y SFFOR definidas en los MEG, ahora tienen las siguientes relaciones [44]:

$$SFR = 0.1\gamma T_d A_d \int_{I_{min}}^{I_{max}} P(I) dI \quad (3.41)$$

$$SFFOR = 0.1\gamma T_d A_d \int_{I_{cr*}}^{I_{max}} P(I) dI \quad (3.42)$$

Donde, γ posee un valor de 0.015, T_d son la cantidad de días de tormenta eléctrica anuales, I es la corriente de cresta del rayo en [kA] y A_d es el ancho de captación de rayos en [m].

En la ecuación 3.42, el limite inferior de integración, corresponde a la corriente I_{cr*} [kA], esta se define como el valor mínimo de la corriente de rayo que impacta a la línea de transmisión y causa flameo en la cadena de aisladores. Este valor puede superar o igualar al valor de la corriente crítica de flameo definido en la ecuación (3.27) para el MEG.

3.4. Actualizaciones de los modelos tradicionales

En esta sección se explica una serie de mejoras aplicadas a los modelos tradicionales a fin de actualizarse.

3.4.1. Actualizaciones al MEG

Para el MEG una serie de actualizaciones se han propuesto para incorporar los índices de falla por flameo. En [14] y [13] proponen modificar la obtención del valor de la corriente crítica I_{crit} , incorporando la tensión de la red (polo) U_{line} , como se indica en la ecuación 3.43.

$$I_{crit} = \frac{2(U_{crit} - U_{line})}{Z_u} \quad (3.43)$$

La modificación de las ecuaciones de corriente crítica (3.27) por la ecuación (3.43), modifica los valores de $SFFOR$ y $SFFOR_{st}$.

3.4.2. Actualizaciones al MLP

3.4.2.a. Actualizaciones al calculo de los SFFOR

Para reforzar el cálculo del SFFOR en el MLP. Se identificará el conductor impactado por la DEAT y luego, se evaluará su respectivo SFFOR implementando la ecuación (3.43).

3.4.2.b. Actualización al criterio de líder ascendente

Se incorpora, en reemplazo del criterio de líder ascendente de Rizk, presentado en la ecuación (3.2), un modelo de líder que es dependiente de la tensión del conductor. Este modelo, corresponde al modelo auto-consistente de inicio y propagación del líder ascendente, (*self-consistent upward leader inception and propagation model-SLIM*), el cual se basa en el modelo de líder ascendente de Becerra [30]. Este modelo integra la morfología

del líder ascendente, abarcando desde el proceso de formación del canal del streamer y las zonas de corona, hasta el líder estable y su posterior unión con el líder descendiente. En la Figura 3.15 se muestra la distribución de potencial (eje horizontal) según longitud del líder (eje vertical), para el modelo auto-consistente.

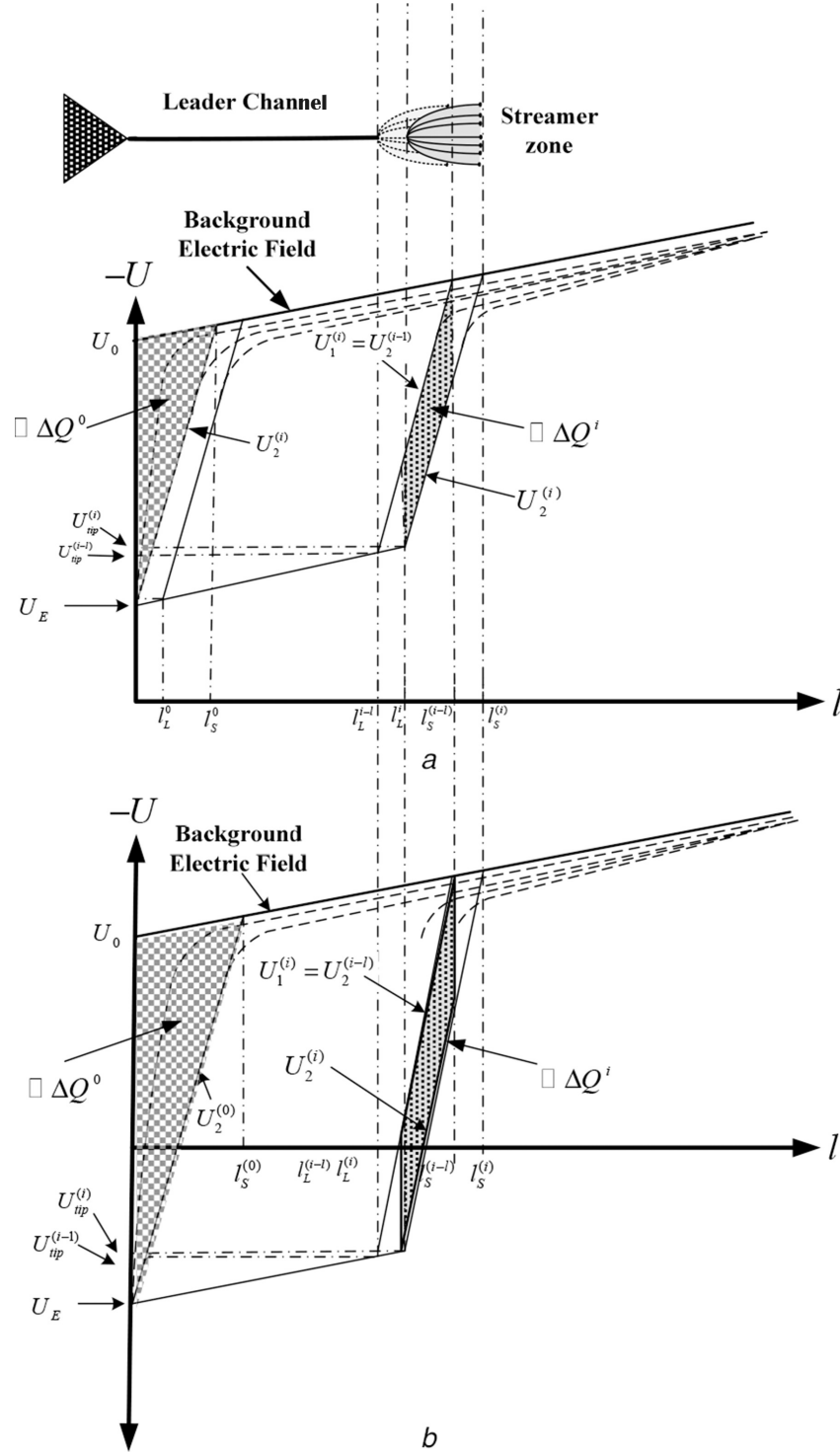


Figura 3.15: Distribución de potencial en el streamer para el modelo auto-consistente de Becerra. Polo negativo y positivo. [46]

La implementación del modelo auto-consistente requiere el calculo de la carga previo en la zona corona mediante las siguientes ecuaciones [47].

$$l_S^0 = \frac{U_o + U_E}{E_{str} - E_b} \quad (3.44)$$

$$l_S^0 = \frac{U_o - U_E}{E_{str} + E_b} \quad (3.45)$$

$$\Delta Q^0 = \frac{K_Q}{2} \left(\frac{l_s^0}{2} \right)^2 (E_{str} - E_b) \quad (3.46)$$

Donde:

- U_o [V] es la magnitud de la tensión inducida en el punto por el rayo.
- E_b [V/m] es la magnitud del campo eléctrico presente.
- E_{str} [V/m] es el campo eléctrico de la zona corona del streamer, el cual según [48] se considera constante.
- U_E [V] es la magnitud del potencial del conductor.
- l_s^0 [m] es el largo de la zona streamer de corona en el paso previo en el conductor.
- K_Q es un factor geométrico, el cual se considerará que es el valor obtenido por Becerra, $3.5 * 10^{-11}$ [Cm/V] [30].

La ecuación (3.44) se aplica para el análisis de líder ascendente proveniente de un conductor positivo. En tanto la ecuación (3.45) se aplica para un líder ascendente proveniente de un conductor negativo [47].

El criterio de inicio, para la transición de streamer a un líder inestable, recae en la presencia, de un nivel de carga superior a un valor crítico. En este estudio se considera que el nivel de carga ΔQ^0 supera o iguala a $1[\mu\text{C}]$ [47].

Con las siguientes ecuaciones es posible obtener para el i -esimo paso del líder, la variación de carga en la zona corona del streamer (ΔQ^i), el crecimiento del canal del líder (Δl_L^i) y el largo final del líder (l_L^{i+1}).

$$U_{\text{tip}}^i = |U_E - \left(E_\infty \cdot l_L^i + x_0 \cdot E_\infty \cdot \ln \left[\frac{E_{\text{init}} - E_\infty}{E_\infty} e^{-\frac{l_L^i}{x_0}} \right] \right)| \quad (3.47)$$

$$l_s^{(i)} = l_s^0 + \frac{E_{\text{str}} \cdot (l_L - U_{\text{tip}}^{(i)})}{E_{\text{str}} - E_b} \quad (3.48)$$

$$\Delta Q^{(i)} = K_Q \cdot (l_s^{(i-1)} - l_L) \cdot (E_{\text{str}}(l_L^i - l_L^{(i-1)}) + U_{\text{tip}}^{(i-1)} - U_{\text{tip}}^{(i)}) \quad (3.49)$$

$$\Delta l_L^{(i)} = \frac{\Delta Q^{(i)}}{q_L} \quad (3.50)$$

$$l_L^{(i+1)} = l_L^{(i)} + \Delta l_L^{(i)} \quad (3.51)$$

Donde U_{tip}^i es la tensión en la punta del líder para el paso i , E_∞ y E_i son el valor final e inicial del gradiente del líder respectivamente. $(x_o=v\theta)$, v es la velocidad del líder ascendente y θ es la constante de tiempo de variación de la conductancia del canal del líder (usualmente entre 30-60 $[\mu s]$). En tanto q_L se define como el valor de la carga por unidad de longitud cuando la región de ionización de corona proporciona la carga necesaria para suministrar la energía necesaria, para los procesos termodinámicos de expansión del líder [47].

La condición para la formación del líder, debe cumplir con un mínimo de carga ($\Delta Q^i \geq 1[\mu C]$), hasta llegar al largo máximo l_{MAX} . La metodología explicada en [47] y en [30] determina que al llegar a la longitud l_{MAX} , el líder ascendente es lo suficientemente estable para producir la unión entre los líderes.

De acuerdo a la Figura 3.15, el área sombreada es proporcional a la formación de carga en la zona de corona inicial (ΔQ^0), ubicada en la superficie del conductor y para cada uno de los pasos en los que se forma el líder ascendente (ΔQ^i). Por lo tanto la condición, que solicita una variación de carga en el i -ésimo paso superior o igual a 1 microcoulomb, ($\Delta Q^i \geq 1 [\mu C]$) se ve favorecida para el polo positivo.

3.5. Aplicación del modelo de líder progresivo para líneas HVAC

En base a lo explicado en la Sección 3.1.10, el nivel de tensión del conductor incide en el comportamiento de su líder ascendente. Por esta razón, para líneas de más de 200[kV], se sugiere el uso del MLP en lugar del MEG [10].

En [47] se investiga el efecto de la variación temporal de la tensión de las fases en una línea HVAC de 500 [kV]. Para ello se empleo un modelo de líder progresivo actualizado, con las directrices explicadas en la Sección 3.4.2 e incorporando la variación sinusoidal. Los investigadores efectuaron mediciones en 12 puntos diferentes a lo largo de un ciclo, es decir, cada 30 grados de la onda sinusoidal. Estas mediciones permitieron determinar valores promedio para tasas anuales de falla de apantallamiento y la tasa de flameo por falla de apantallamiento y contribuir a la modelación de los modelos avanzados progresivos.

Capítulo 4

Aplicación de los modelos electro-geométricos y de líder progresivo en la línea Kimal-Lo Aguirre

En este capítulo se indican las características de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre, parámetros y antecedentes necesarios para la aplicación de los MEG Y MLP.

4.1. Parámetros de las torres

Si bien dentro del EIA [49] [50] se establecen zonas de mayor afectación por descargas atmosféricas y granizos, para este trabajo se considerará la totalidad de la línea, En este estudio establecen las siguientes zonas de interés:

Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Longitud [km]	417.2	103.2	308.5	374.8	111	73.4

Tabla 4.1: Longitud de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre por zona.

Nota: Entiéndase Atacama como el resto de la región homónima excluyendo a la comuna de Diego de Almagro, la cual según el EIA es más propensa a DEAT. Para cada trazado se trabaja con su torre más representativa, con el fin de simplificar la aplicación de los modelos.

Para Antofagasta, la estructura más frecuente de la línea, es la torre G6KL (Figura 4.1). Esta región cuenta con un total de 828 torres, de las cuales 737 son atirantadas, 26 de anclaje, 58 de suspensión y 7 de remate.

En tanto, para Diego de Almagro (entiéndase como el trazado desde la primera torre de la región de Atacama hasta la comuna de Diego de Almagro), la torre más representativa corresponde a la estructura GR6KL (Figura 4.2).

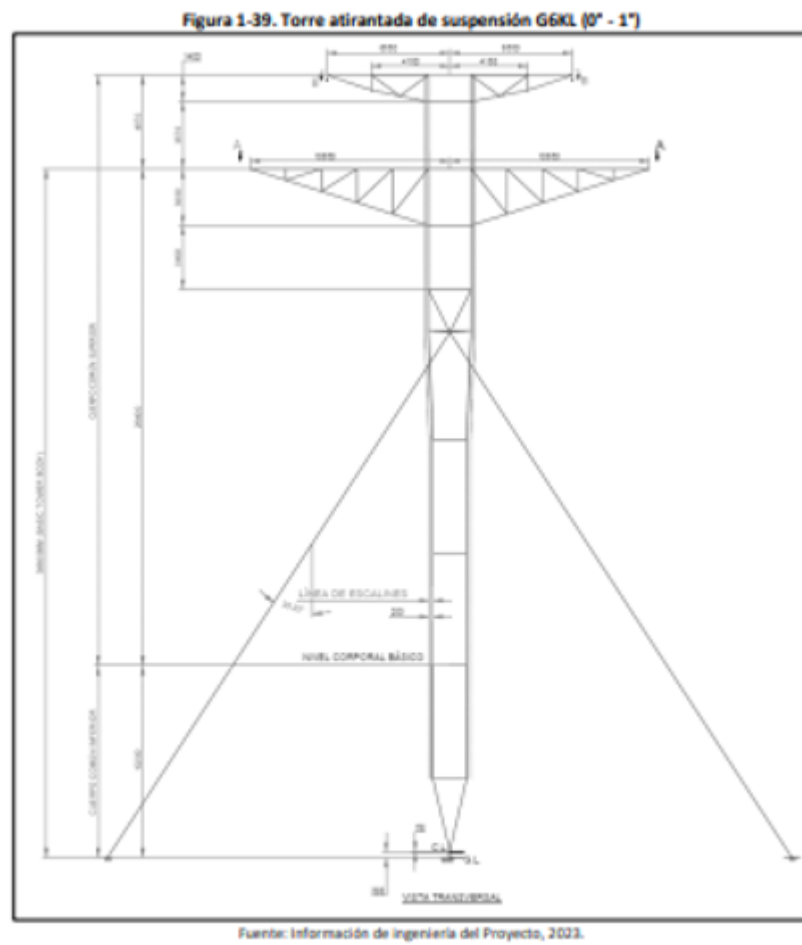


Figura 4.1: Torre representativa G6KL. [16]

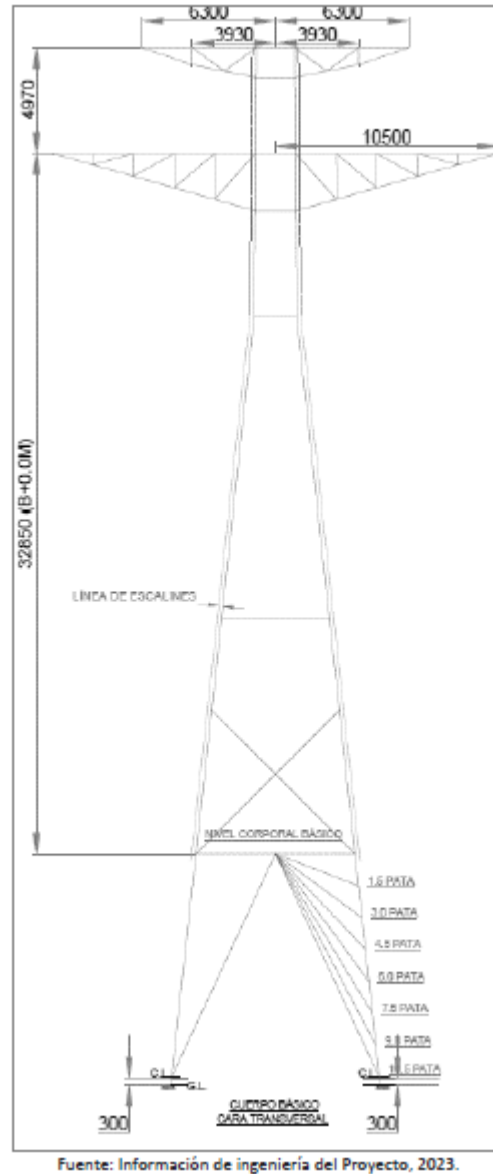


Figura 4.3: Torre representativa S6KL. [16]

Respecto a la geometría de las torres y las cadenas de aisladores por cada tramo), se emplean las coordenadas indicadas en la siguiente Tabla 4.2. Se considera la coordenada de referencia central, aquel que corresponde al eje de simetría de cada torre a nivel del plano de suelo, es decir la coordenada (0.0).

	Polos				Guarda				DMR			
	X+	X-	Y+	Y-	XG1	XG2	YG1	YG2	XDMR1	XDMR2	YDMR1	YDMR2
Antofagasta	10.65	-10.65	26.4	26.400	6.55	-6.55	41.32	41.32	4.18	-4.18	38.57	38.57
Diego de Almagro	12.05	-12.05	31.95	31.95	6.60	-6.600	47.10	47.10	4.43	-4.43	44.1	44.1
Torres S6KL	10.5	-10.5	40.95	40.95	6.30	-6.30	54.41	54.41	3.93	-3.93	51.84	51.84

Tabla 4.2: Coordenadas de los conductores, guarda y DMR en metros.

Símbolo	Significado
X+	Coordenada abscisa del polo positivo
X-	Coordenada abscisa del polo negativo
Y+	Coordenada ordenada del polo positivo
Y-	Coordenada ordenada del polo negativo
XG1	Coordenada abscisa del cable de guarda 1
XG2	Coordenada abscisa del cable de guarda 2
YG1	Coordenada ordenada del cable de guarda 1
YG2	Coordenada ordenada del cable de guarda 2
XDMR1	Coordenada abscisa del cable DMR 1
XDMR2	Coordenada abscisa del cable DMR 2
YDMR1	Coordenada ordenada del cable DMR 1
YDMR2	Coordenada ordenada del cable DMR 2

Tabla 4.3: Significado de las coordenadas de conductores de la línea HVDC.

Independiente del sector del trazado del proyecto HVDC Kimal-Lo Aguirre las características de los conductores de polo, el DMR y el OPWG (guarda) no varían. Los datos de los conductores de polo se presentan en la Tabla 4.4 [16]:

Parámetro	Descripción
Conductor	AAC COWSLIP
N° sub conductores por polo	4
Diámetro del conductor	4.14 [cm]
Sección del conductor	1015.8 [mm ²]
Peso unitario	2.787 [kg/m]
Tensión de rotura	153 [kN]
Radio del haz equivalente	42.42[cm]

Tabla 4.4: Características del conductor de polo.

Los datos de los conductores DMR se presentan en la Tabla 4.5:

Parámetro	Descripción
Conductor	ACAR 1100 MCM
N° sub conductores por arreglo	4
Diámetro del conductor	3.016 [cm]
Sección del conductor	557.24 [mm ²]
Peso unitario	1.53 [kg/m]
Tensión de rotura	123 [kN]
Radio del haz equivalente	22.86[cm]

Tabla 4.5: Características del DMR.

Los datos para el cable de guarda OPGW, se presentan en la siguiente tabla.

Parámetro	Descripción
N° mínimo de fibras	24
Protección de núcleo óptico	Tubo metálico
Material hilos	Acero aluminio
Diámetro del cable completo	14.4 [mm]
Peso unitario máximo del cable completo	0.7 [kg/m]
Capacidad mínima de corriente de cortocircuito	81 [kA^2s]
Resistencia eléctrica	0.5173 [Ohm/km]

Tabla 4.6: Características del cable de guarda OPWG.

4.2. Otros parámetros

4.2.1. Días de tormenta

En la Tabla 4.7, se da a conocer los días de tormentas [51] considerados para la aplicación de los distintos modelos.

Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	Metropolitana
14 [días/año]	9 [días/año]	9 [días/año]	5 [días/año]	6 [días/año]	7 [días/año]

Tabla 4.7: Días de tormenta anuales por región.

4.2.2. Ancho de captación

En la Tabla 4.8, se da a conocer los anchos de captación [m], considerados para la aplicación de los distintos modelos.

Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	Metropolitana
7 [m]	5[m]	5 [m]	7 [m]	5 [m]	5 [m]

Tabla 4.8: Ancho de captación de rayos.

4.3. Aplicación del modelo electro-geométrico

4.3.1. Consideraciones generales

- El MEG sera aplicado para las torres representativas G6KL, GR6KL y S6KL.
- Los parámetros para S_g serán $A=10$ $B=0.65$ y $\gamma=1$. Estos serán empleados en las ecuaciones (3.3) y (3.4).
- Las torres G6KL, GR6KL y S6KL son de doble circuito, se aplicara MEG tradicional a un solo circuito y se duplicaran los resultados de impactos y tasas de falla.
- La corriente mínima sera de 2[kA] y la corriente máxima sera de 200[kA].
- Dado que la corriente mínima de 2[kA], genera un radio S de tal longitud que para el dominio de corrientes de trabajo, el DMR se vera apantallado por el guarda y el polo.

- La corriente crítica obedece a la ecuación (3.27) para el MEG tradicional.
- Para obtener los índices SFR Y SFFOR debido a fallas de apantallamiento, es necesario analizar un intervalo de corrientes que permita verificar la cantidad de rayos que impactan en los conductores de polo, y cuántos de estos rayos resultan en flameo directo a los aisladores.
- Se evaluará la línea HVDC mediante el MEG, bajo los puntos anteriores, para un escenario de omisión total del cable de guarda, a fin de evaluar el desempeño del DMR como blindaje.

4.3.2. Descripción del modelo

En primer lugar se necesita de datos correspondientes al conductor, geometría de las torres, longitud de la línea, días tormenta año, corriente crítica y corriente máxima.

Una vez que se hayan recopilado todos los datos de entrada del MEG, se emplea el proceso que se describe de la siguiente manera:

- I) Inicialmente se comienza la simulación desde la corriente mínima con un paso de $0.1[\text{kA}]$. Los siguientes pasos se aplican para cada corriente empleada.
- II) Después, se calculan la distancia de impacto, distancia crítica a tierra y la densidad de probabilidad de corriente.
- III) Luego, se calculan las distancias laterales atractivas R_{EGM} y R_{EGM2} .
- IV) Entonces, se calculan los anchos expuestos del cable de guarda y del conductor de polo.
- V) Finalmente, se evalúa si se ha completado el intervalo de corrientes, de no ser así se añade $0.1[\text{kA}]$ a la corriente y se repiten pasos anteriores, finalmente, se calculan los SFR Y SFFOR totales.

En la Figura 4.4, muestra un diagrama con las etapas de aplicación del MEG.

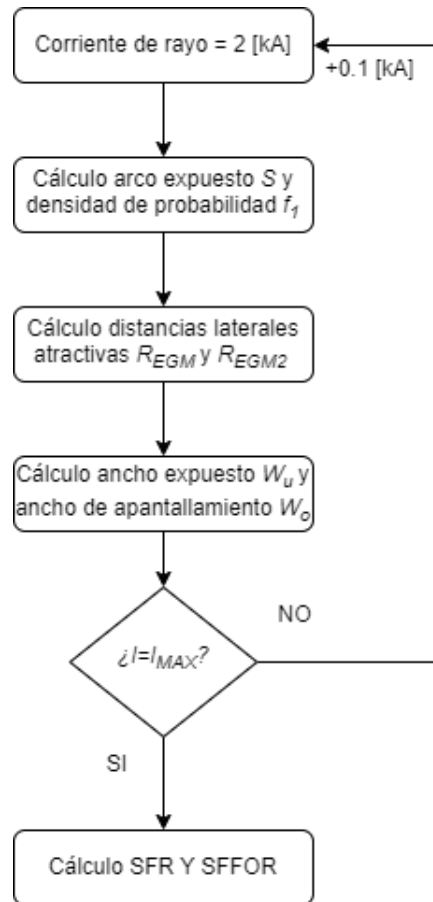


Figura 4.4: Aplicación de la metodología MEG. Elaboración propia.

4.3.3. Actualización del MEG

Para el modelo actualizado descrito en la Sección 3.4.1, el principal cambio a efectuar para cada una de las zonas definidas para la línea, es la incorporación de la tensión de los polos de la red. Para ello se trabajó de la siguiente forma:

- Se conservan las consideraciones generales y la descripción del modelo. Se optimiza el trabajo con el MEG utilizando un solo circuito en las líneas dobles, aprovechando la simetría de las torres analizadas. En lugar de duplicar los cálculos de impactos y tasas, se obtienen resultados evaluando primero un polo y luego su opuesto, manteniendo la misma configuración de conductores. Finalmente, se suman los resultados obtenidos para ambos polos.

4.4. Aplicación del modelo de Líder Progresivo

4.4.1. Simulación líder descendente

- Para el líder descendente se considera la nube de tormenta a 4[km] de altura respecto al suelo.

- La tortuosidad del líder se genera aleatoriamente bajo lo descrito en la Sección 3.3.
- El área sobre la cual se inicia el líder, corresponde a la extensión total de la línea HVDC, por un ancho equivalente al diámetro de la nube de tormenta (4[km]).

4.4.2. Respecto a línea de transmisión

- Las matrices de transmisión *x-catenaria* y *z-catenaria* serán elaboradas según el modelo y ecuaciones del Anexo D.
- Para toda la franja de transmisión se asumirá que las torres están en terreno plano.
- La matriz de transmisión *x-catenaria* posee la descripción de la catenaria de conductores a través del eje x, la matriz *z-catenaria* corresponde al punto de catenaria en el eje z [41].

4.4.3. Consideraciones tasa de falla

- Se emplean en este estudio los índices SFR Y SFFOR para determinar el estado de apantallamiento de la línea. Se comparan los resultados con los valores sugeridos por la IEEE.
- Cuando no hay unión entre líderes las tasas serán nulas.
- El MLP considera un ancho de captación de rayos igual al largo del segmento horizontal que describe a la línea [41].

4.4.4. Descripción del MLP

Los parámetros necesarios para iniciar el modelo corresponden a la geometría de las torres de transmisión, radio de los conductores, los días de tormenta de la región, corriente crítica, matriz de catenaria $\mathbf{x}$ y $\mathbf{z}$ y el ancho de captación A_d .

Una vez recopilados los datos de entradas, se emplea el proceso que se describe de la siguiente manera [52]:

- I) Se genera un líder descendente de manera aleatoria.
- II) Se establece una corriente de rayo inicial de 2[kA] para la simulación.
- III) Se da el primer paso del líder negativo descendente y con el se calculan las cargas Q_T , Q_i y Q_o . Con la carga de la punta del líder se determina su tensión V_B .
- IV) Se calcula la tensión inducida V_s en un punto del espacio $S(i,j)$ de la matriz de transmisión.
- V) Se evalúa si la tensión inducida V_s supera a la tensión crítica de Rizk. Al cumplirse se establece la presencia de un líder ascendente positivo continuo desde el punto S. Si no se cumple, se debe evaluar en los siguientes puntos de la matriz.
- VI) Se traza un gap de 10[m] vertical en el punto S una vez definido el líder ascendente.

- VII) Cuando el campo E_B supera los 500[kV/m]; existe unión entre líderes. Si no existe la unión, se repite el proceso con un nuevo paso del líder hasta dar con la unión de los líderes o hasta que el líder descendente impacte hacia tierra con corriente inferior a 200[kA]. Si se el impacto, se procede a repetir el proceso, desde el punto de origen del líder, pero con 1[kA] adicional de rayo. Si se completa el trazado sin producir la unión entre ambos líderes hasta 200[kA], se hablara de índices SFR Y SSFOR nulos.
- VIII) En caso de unión líderes se calculan los índices SFR Y SSFOR empleando las ecuaciones de la Sección 3.3.4.
- IX) Se repite el proceso 500 veces (con distinto punto de origen) a fin de tener una muestra representativa de acuerdo a [8] .

La Figura 4.5, se entrega un diagrama con las etapas de aplicación del MLP.

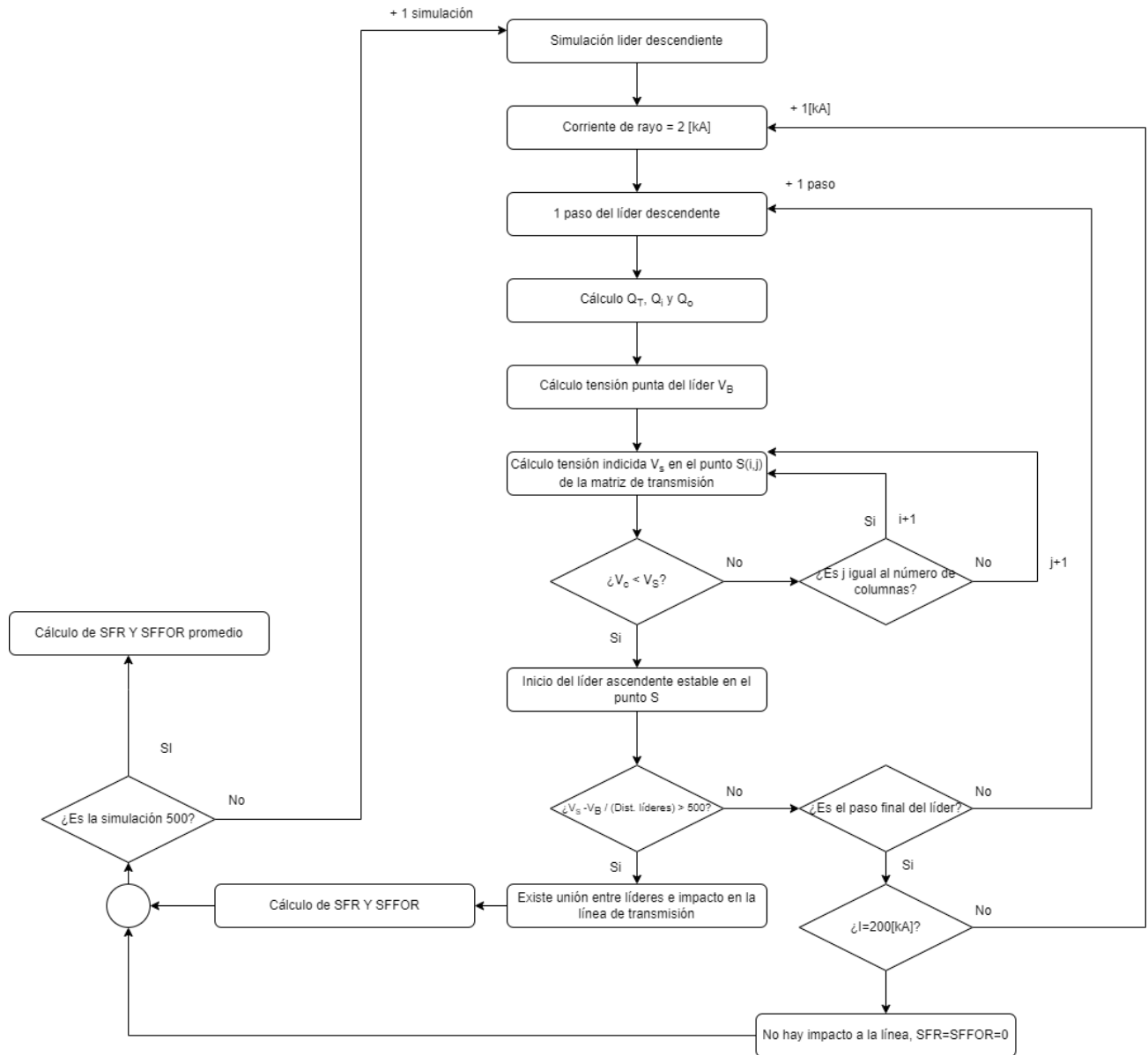


Figura 4.5: Aplicación del MLP para estimación de fallas de apantallamiento. Elaboración propia.

4.4.5. Actualización para el modelo actualizado

Para el modelo actualizado descrito en la Sección 3.4.2. El primer cambio a efectuar para el MLP es la incorporación de la tensión de los polos de la red en la evaluación de la tasa anual de flameos por falla de apantallamiento. Además se mantienen los impactos obtenidos bajo la aplicación tradicional tras ello se identifican los conductores impactados según su nivel de tensión. Para el respectivo impacto y nivel de corriente, se calcula el SFFOR empleando la ecuación (3.42) con la corriente crítica descrita en la ecuación (3.27).

Cambios en el criterio de líder ascendente y unión líderes

Se siguen los pasos del modelo de líder progresivo **MLP** hasta calcular la tensión inducida en el punto $S(i,j)$ de la matriz de transmisión. Después de esto, se procede a:

- I) Se establece el campo E_b y la tensión del conductor j -esimo U_E .
- II) Se calcula l_S^0 y ΔQ^0 . Si $\Delta Q^0 < 1[\mu C]$, no se tiene un líder ascendente y se procede a evaluar el punto $S(i,j+1)$. Si j es igual a la cantidad de conductores se procede a ir al punto $i+1$.
- III) Si $\Delta Q^0 \geq 1[\mu C]$, se calculan U_{tip}^{i-1} , ΔQ^i , ΔL^i y l_L^{i+1} .
- IV) Se calcula ΔQ^i , si es menor a $1[\mu C]$ el líder ascendente resulta inestable, por lo que se procede a evaluar el punto $S(i,j+1)$. Si j es igual a la cantidad de conductores se procede a ir al punto $i+1$. Si $\Delta Q^i \geq 1[\mu C]$ y el largo del líder l_L^i es menor a l_{max} se incrementa el paso del líder (paso $i+1$) y se vuelve al segundo paso descrito en esta sección.
- V) Cuando se llega a l_{max} , el modelo considera que hay unión entre líderes. Si no hay unión se repite el proceso con un nuevo paso del líder hasta dar con unión de los líderes o hasta que el líder descendente impacte hacia tierra con corriente inferior a $200[kA]$. Si se da tal impacto, se procede a repetir el proceso, desde el punto de origen del líder, pero con $1[kA]$ adicional de rayo. Si se completa el trazado sin producir unión de líderes hasta $200[kA]$, se hablara de índices SFR Y SSFOR nulos.
- VI) En caso de unión de líderes se calculan los índices SFR Y SSFOR, empleando las ecuaciones de la Sección 3.3.4.
- VII) Se repite el proceso 500 veces (con distinto punto origen) a fin de tener una muestra representativa de acuerdo a [8] .

En la Figura 4.6, se muestra un diagrama de las etapas incorporadas en la evaluación del líder ascendente [47].

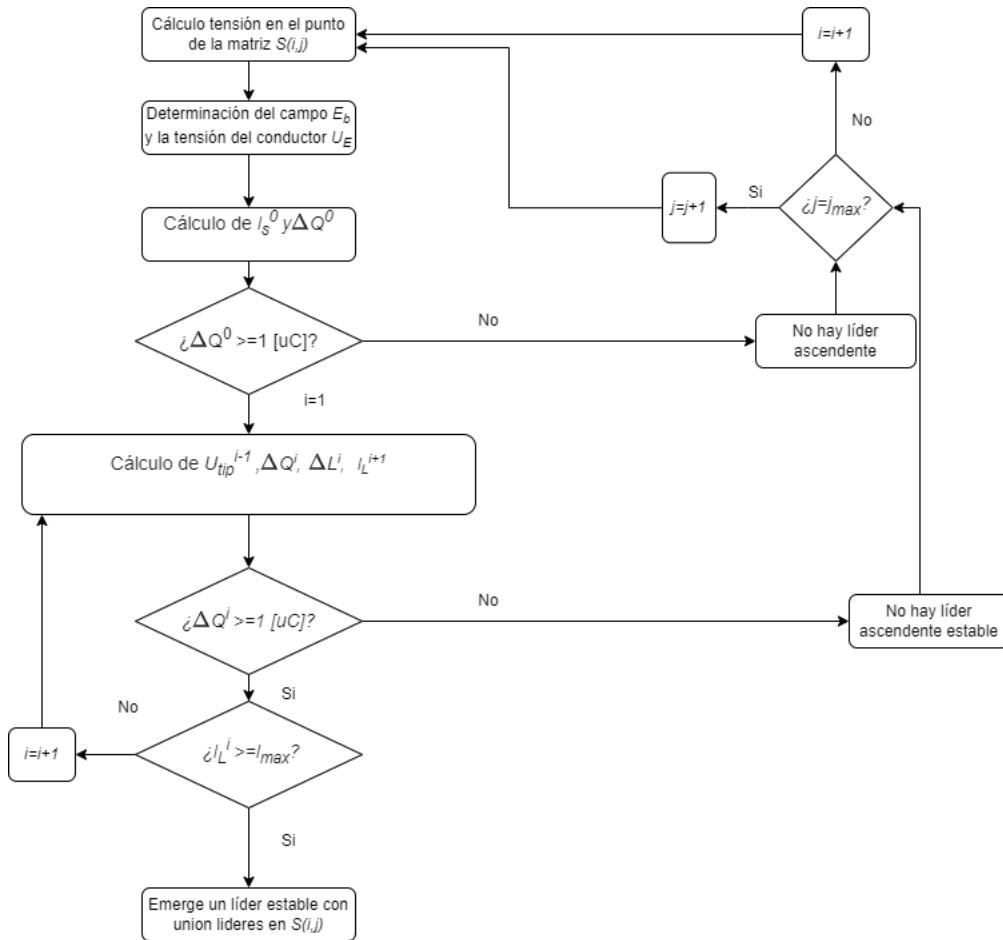


Figura 4.6: Evaluación del líder ascendente. Elaboración propia.

Los valores de los parámetros necesarios para modelar el líder ascendente se presentan en la Tabla 4.9

	Descripción	Valor	Unidades
$l_L^{(0)}$	Longitud de la punta en la segunda zona de corona.	$5 \cdot 10^{-3}$	m
$l_L^{(1)}$	Longitud inicial del líder.	$5 \cdot 10^{-2}$	m
r_L	Radio del líder.	10^{-4}	m
E_{str}	Gradiente del streamer positivo.	$4.5 \cdot 10^5$	V/m
E_x	Campo cuasi-estacionario final del líder.	$3 \cdot 10^4$	V/m
v	Velocidad del líder positivo ascendente.	$1.5 \cdot 10^4$	m/s
θ	Constante de tiempo del líder.	$50 \cdot 10^{-6}$	s
q_L	Carga por unidad de longitud necesaria para la transición térmica.	$65 \cdot 10^{-6}$	C/m
l_{max}	La longitud máxima del líder a simular.	2	m
θ	Semi-ángulo de la zona corona.	60	grados

Tabla 4.9: Parámetros modelo líder ascendente

4.5. Operación en estado de emergencia

En este estudio se considerará un escenario de falla en la operación de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre, donde la siguiente condición de esta operación es descrita como:

- Monopolar de emergencia, polo positivo en operación operando a 2000[MW] y 3.33[kA], DMR1 a 75[kV]. Para la línea se mantienen físicamente, los conductores de polo y conductores de guarda presentes, es decir, no se eliminan de la geometría a pesar de tener corriente y tensión cero [16].

Esta condición de operación fue analizada en el *Estudio de Impacto Ambiental* [16], para análisis de campos eléctricos, efecto corona y radio interferencia.

Bajo la condición anterior, se compararan los SFFOR obtenibles mediante MEG y MLP en su forma tradicional y considerando sus actualizaciones.

Los 75[kV] del DMR1 corresponden al voltaje del conductor DMR al final de la línea, debido a la corriente de retorno hacia la fuente monopolar, en las condiciones de flujo de potencia indicadas.

Capítulo 5

Análisis y resultados

En este capítulo se presentaran los resultados obtenidos tras la aplicación de los MEG Y MLP con sus actualizaciones, en conjunto a una comparación entre los modelos para distintos escenarios de operación.

5.1. Resultados aplicación del MEG

En primer lugar, se comparan los índices SFR y la I_{max} [kA] de la línea tanto en operación nominal como con el cable de guarda caído. Esto se realiza con el objetivo de analizar el desempeño del DMR como mecanismo de apantallamiento.

	Antofagasta	Diego de Almagro
SFR[impactos de rayo/año]	0.02	0.0093
Imax[kA]	10.27	15.5

Tabla 5.1: Aplicación del MEG sobre línea en operación nominal.

	Antofagasta	Diego de Almagro
SFR[impactos de rayo/año]	0.083	0.055
Imax[kA]	16.1	24.8

Tabla 5.2: Aplicación del MEG sobre línea sin cable guarda con apantallamiento ofrecido por el DMR.

En condiciones de operación nominal, el DMR carece de contribución para el MEG. Como el rayo cae de forma vertical, su aporte, se ve cubierto por el arco de blindaje originado por el cable de guarda, es decir, se apantalla en totalidad el arco atribuible al DMR. Este mismo criterio también se considero para la evaluación del MEG actualizado.

En la Tabla 5.3, se procede a entregar los resultados para el MEG tradicional y el MEG actualizado.

		Antofagasta	Diego De Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Tradicional	I_{max} [kA]	10.27	15.5	19	19	19	19
	I_{crit} [kA]	10.6	10.32	10	10	10	10
	SFR [impactos de rayo/año]	0.02	0.009	0.037	0.021	0.008	0.007
	SFR_{st} [impactos de rayo/(100km año)]	0.005	0.009	0.012	0.006	0.007	0.009
	SFFOR [flameos por impacto de rayo/año]	NA	0.003	0.023	0.013	0.005	0.004
	$SFFOR_{st}$ [flameos por impacto de rayo/(100km año)]	NA	0.003	0.008	0.004	0.005	0.006
	Angulo Apantallamiento [°]	15	19.78	17.32	17.32	17.32	17.32
Actualizado	I_{crit} Polo + [kA]	6.1	5.9	5.7	5.7	5.7	5.7
	I_{crit} Polo - [kA]	15.5	14.7	14.4	14.4	14.4	14.4
	$SFFOR_{st}$ [flameos por impacto de rayo/(100km año)]	0.001	0.004	0.007	0.0033	0.004	0.005

Tabla 5.3: Resultados modelo electro-geométrico.

5.1.1. Corriente crítica de flameo en los aisladores

De acuerdo a la IEEE, en [39] las líneas de transmisión deben diseñarse con una corriente crítica superior a 5[kA]. Para la totalidad de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre bajo el modelo tradicional esto se cumple, prácticamente duplicando el valor recomendado. Respecto al MEG actualizado, en la evaluación para el circuito de polo positivo y negativo se obtuvieron valores de I_{crit} que cumplen con el valor mínimo de norma. Los valores menores en el polo positivo influyen en la obtención de valores de SFFOR más altas, y por ende en un mayor rango de valores que producirían flameo en aisladores.

5.1.2. Corriente máxima

En este trabajo, cualquier corriente sobre la corriente máxima, para todas las DEAT, independiente de la zona analizada, se consideran como impactos al cable de guarda. En las zonas donde predomina la torre S6KL: Atacama, Coquimbo, Valparaíso y la Región Metropolitana, cuentan con el mayor valor de corriente máxima, así como también, estas zonas tienen los menores valores de corriente crítica. Si bien, preliminarmente, estos valores, dan la idea de que, en estas zonas se tienen conductores de polo con mayor exposición a impactos, no son argumentos suficientes para dar conclusiones.

Aunque una corriente máxima elevada, asociada únicamente a la disposición de conductores en las diferentes torres del proyecto, permite identificar un rango de interés al considerar la corriente crítica y mínima en conjunto, esto no es suficiente para un análisis completo. Es necesario incorporar la densidad de probabilidad de las corrientes de interés, los días de tormenta en la zona y la longitud de la línea

5.1.3. Ángulo de apantallamiento y ángulo de apantallamiento perfecto

La norma IEEE 1410-2010 [39] recomienda que en la construcción de líneas de transmisión, el ángulo de apantallamiento sea inferior a 30°. Para la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre para las estructuras elegidas como representativas se obtuvieron ángulos entre los 15° a 20° aproximadamente, lo que cumple con la norma. Respecto a los ángulos de apantallamiento perfectos (Sección 3.2.3) para cada zona, estos se indican en la Tabla 5.4.

	Antofagasta	Diego De Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Ángulo Perfecto [grados]	15.13	7.76	3.72	3.72	3.72	3.72

Tabla 5.4: Ángulos de apantallamiento perfecto.

Para el caso de Antofagasta es correcto mencionar que el ángulo perfecto es aproximadamente el mismo valor que el ángulo vigente, lo que se explica al tener un valor de I_{max} muy cercano a I_{crit} .

5.1.4. Análisis del SFR Y SFR estandarizados

Si bien Antofagasta es la región con mayor cantidad de días de tormenta promedio, la región de Atacama presenta el SFR más alto en total, ello se debe a que el índice

SFR, depende también, de la longitud de la línea, la corriente máxima y la disposición de conductores.

Por ejemplo, para la torre representativa de la región de Antofagasta, la disposición de conductores favoreció la obtención de una tasa de falla de apantallamiento menor, en contraste a la región de Coquimbo que tiene un nivel de SFR similar con menos días de tormenta, ello se debe a que su corriente máxima es mayor (19[kA]), corriente que depende de la disposición de conductores de la torre representativa.

El SFR total de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre es de 0.1029[impactos de rayo/año]. En tanto el SFR estandarizado es de 0.0075[impactos de rayo/(100km·año)]. El SFR estandarizado es menor dado que la longitud del proyecto supera los 100[km].

Al analizar los índices SFR estandarizados de dos zonas con mismos días de tormenta anuales, Atacama posee un valor 35 % mayor que el de Diego de Almagro, 0.012 y 0.009 [impactos de rayo/(100km·año)] respectivamente. La diferencia de los valores, es atribuible a la disposición de conductores. El análisis de estos indicadores entre estas dos zonas, recae en un análisis de sensibilidad, donde la disposición de conductores sobre las torres GR6KL y las torres S6KL promedio, favorece, en lo que concierne a impactos, a la torre GR6KL.

Al comparar los índices SFR estandarizados de las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana, regiones donde se ha implementado una torre y disposición de conductores promedio idéntica, la disparidad en sus valores, se atribuye a las diferencias en los días promedio de tormenta establecidos. Destaca que la Región Metropolitana exhibe el valor más alto de SFR estandarizado entre las tres regiones analizadas.

5.1.5. Análisis del SFFOR y SFFOR estandarizado

Para la región de Antofagasta, al tener $I_{crit} > I_{max}$ se escapa del análisis del SFFOR para esta aplicación del MEG. Sin embargo, en el Anexo E, se entrega una alternativa para su análisis.

El SFFOR total de la línea (1388[km]) bajo el modelo tradicional es 0.0489[flameos por impacto de rayo/año] y con valor estandarizado de 0.0035[flameos por impacto de rayo/(100km·año)]. Según IEEE, un diseño correcto es aquel que tiene un valor inferior a 0.05 [flameos por impacto de rayo/(100km·año)] y un límite de valor aceptable de 0.1[flameos por impacto de rayo/(100km·año)] [37]. Por lo que la línea cumple con un apantallamiento adecuado. Al evaluar por región, todas cumplen con poseer un valor inferior a 0.05[flameos por impacto de rayo/(100km·año)].

El valor estandarizado permite comparar entre distintas zonas independiente de la longitud de la línea. Al comparar los índices estandarizados de SFFOR entre las zonas de Diego de Almagro (0.0033[flameos por impacto de rayo/(100km·año)]) y de Atacama (0.0075 [flameos por impacto de rayo/(100km·año)]), se observa una diferencia notable del 127.27 %. Esta disparidad obedece a la disposición de los conductores entre las torres.

Es importante señalar, que el índice SFFOR depende de parámetros como la longitud de la línea, corriente crítica, días de tormenta y la disposición de conductores en las torres del trazado. Sobre la corriente crítica, el modelo actualizado incorpora la tensión de polo para su obtención, lo que añade al conductor como un elemento activo para la evaluación del SFFOR (límite inferior de la integral de la función de densidad de probabilidad de corriente).

Para el el circuito correspondiente al polo positivo, las tasas denotan resultados desfavorables para el modelo (menor corriente crítica), lo que es congruente con los principios y ensayos presentados en la sección. Dicho de otra forma, para una misma estructura la operación bajo polo positivo en extra alta tensión, conlleva a mayores tasas anuales de flameo por falla de apantallamiento respecto a la operación con un polo negativo, elemento neutro.

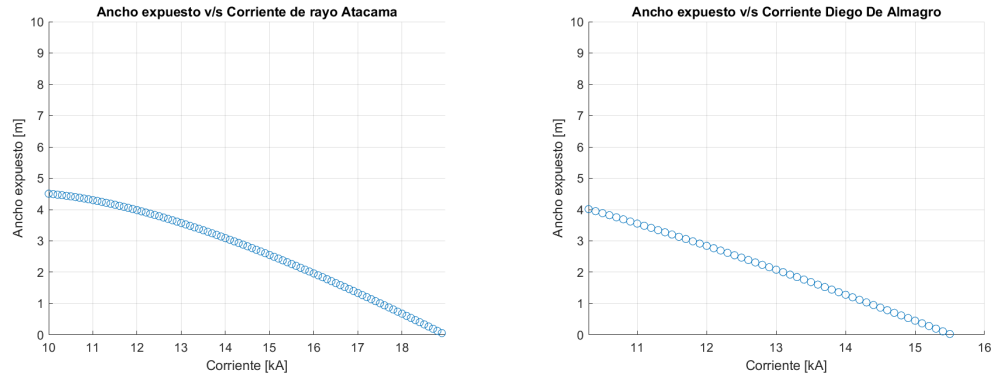
En este modelo actualizado, para cada uno de los tramos designados que componen la línea HVDC, el SFFOR estandarizado, cumple con tener un diseño correcto, pues los valores son inferiores a los recomendados por IEEE 0.05 de [flameos por impacto de rayo/(100km·año)] [37]. El SFFOR del total de la línea es de 0.0503 [flameos por impacto de rayos/año] con valor estandarizado es de 0.0036 [flameos por impacto de rayo/(100km·año)], por lo que para esta evaluación, la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre cumple con un apantallamiento satisfactorio.

5.1.6. Ancho expuesto vs corriente

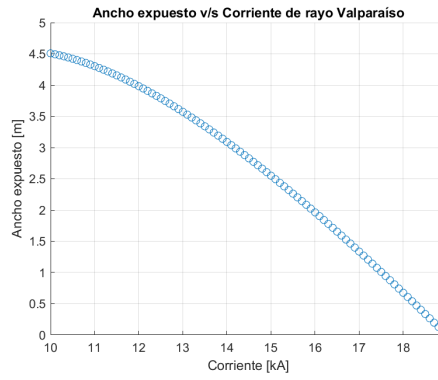
En la Figura 5.1 se muestra la relación entre corriente, y el ancho expuesto, para el rango de corrientes entre I_{crit} e I_{max} para las zonas de Diego de Almagro, Atacama y Valparaíso. Estas zonas fueron determinadas a fin de analizar el comportamiento de los resultados para zonas con mismos días de tormenta (Almagro y Atacama) y zonas con misma torre (Atacama y Valparaíso).

Entre Diego de Almagro y Atacama, se nota que aunque, son zonas con misma cantidad de días de tormenta anuales promedio, la longitud del ancho expuesto dada una determinada corriente es diferente, esto es debido principalmente a las distintas torres representativas para cada tramo. Para todas las zonas el ancho expuesto se vuelve cero, cuando la corriente del rayo posee valor mayor o igual a I_{max} .

Al ser el resto de los parámetros involucrados en la determinación del ancho expuesto iguales, entre Valparaíso y Atacama las curvas son iguales.



(a) Ancho expuesto vs Corriente rayo Atacama (b) Ancho expuesto vs Corriente rayo Diego de Almagro



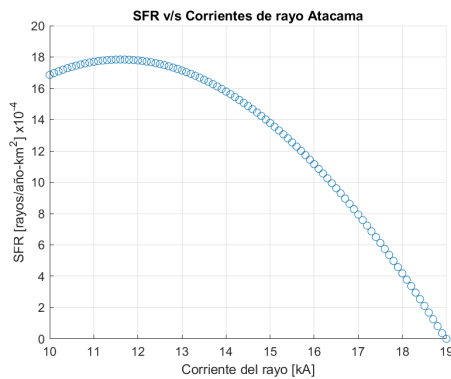
(c) Ancho expuesto vs Corriente rayo Valparaíso

Figura 5.1: Ancho expuesto según corriente de DEAT. Elaboración propia,

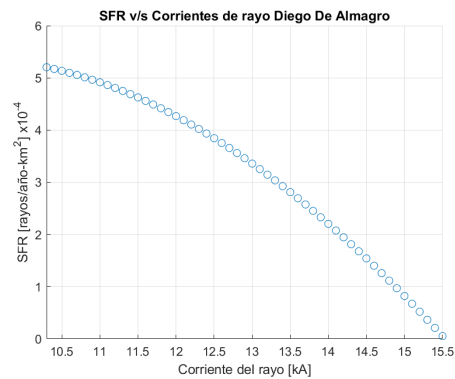
5.1.7. SFR específico vs corriente de rayo

Para las zonas de Atacama, Diego de Almagro y Valparaíso, las tasas de falla de apantallamiento (SFR), son determinadas mediante la ecuación (3.22), para el rango de valores comprendido entre I_{max} e I_{crit} . Para las mismas zonas, en la la Figura 5.2 se muestra que el valor de tasa de falla de apantallamiento específico cae a cero cuando llega la corriente de rayo a su máximo valor. A pesar de ello, el valor máximo de SFR específico no cae necesariamente en el valor mínimo de corriente mostrada, la razón recae en que la probabilidad de que la corriente de la DEAT obtenga un determinado valor va variando según el nivel de corriente.

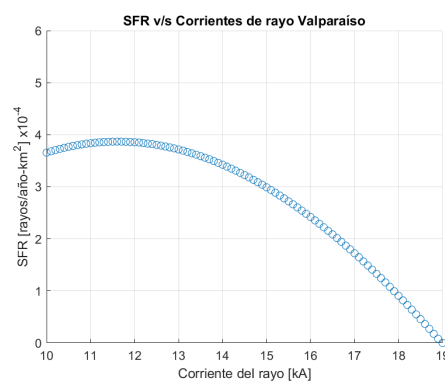
Las diferencias entre zonas además de los factores ya mencionados, se deben a las variaciones en la densidad de rayos a tierra entre las zonas analizadas.



(a) SFR específico vs Corriente Atacama.



(b) SFR específico vs Corriente Diego de Almagro



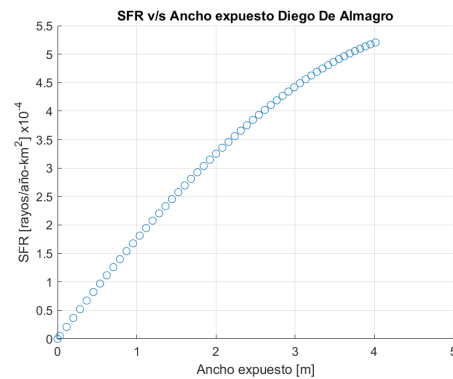
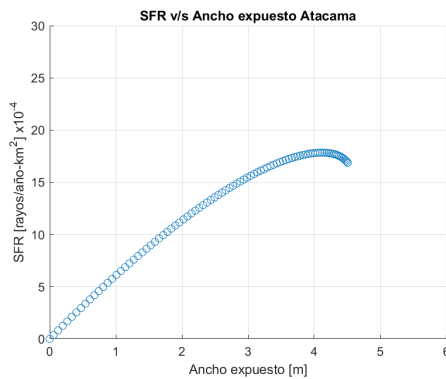
(c) SFR específico vs Corriente Valparaíso

Figura 5.2: SFR específico vs corriente. Elaboración propia.

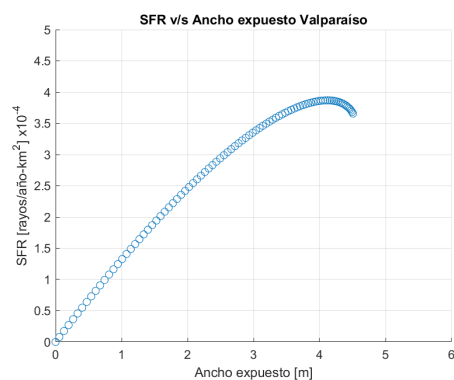
5.1.8. SFR específico vs ancho expuesto

El SFR es dependiente de la geometría de las torres, días de tormenta, densidad de probabilidad de corriente y la longitud de tramo considerada para la zona evaluada. En la Figura 5.3 se aprecia que los valores según zona distan entre sí, pero se mantienen en un orden de magnitud de milésimas. Si bien, la tasa de falla de apantallamiento específica, depende de la densidad de probabilidad de una corriente determinada, no necesariamente eso implica que el mayor valor de la tasa de falla de apantallamiento, se obtiene con un mayor valor de exposición del polo.

Para la aplicación del modelo electro-geométrico, el ancho expuesto obtenido de cualquiera de los polos, no llega a superar los 6[m].



(a) SFR específico vs ancho expuesto Atacama (b) SFR específico vs ancho expuesto Diego de Almagro



(c) SFR específico vs ancho expuesto Valparaíso

Figura 5.3: SFR específico según ancho expuesto. Elaboración propia.

5.2. Resultados del la aplicación del MLP

En esta sección, se entregan los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo de líder progresivo en la totalidad de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre. Tanto en su aplicación tradicional como con la aplicación del modelo actualizado en el calculo de SFFOR.

5.2.1. Simulación del líder descendente

El modelo de líder progresivo tal como se indico en la Sección 3.3, se diferencia del modelo electro-geométrico por su tridimensionalidad y énfasis en la tortuosidad del rayo, En la Figura 5.4 se aprecia una DEAT que impacta al suelo. Este rayo se genero de forma aleatoria y pertenece a uno de los 500 rayos simulados para el área perteneciente a la región de Valparaíso donde se encuentra la línea. En las Figuras 5.5 se aprecia el mismo rayo visto de forma bidimensional.

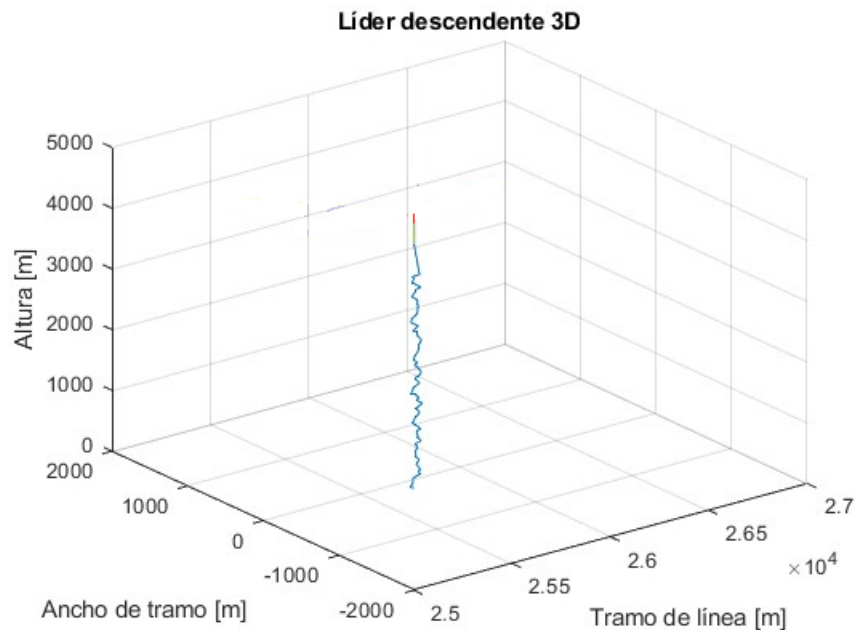
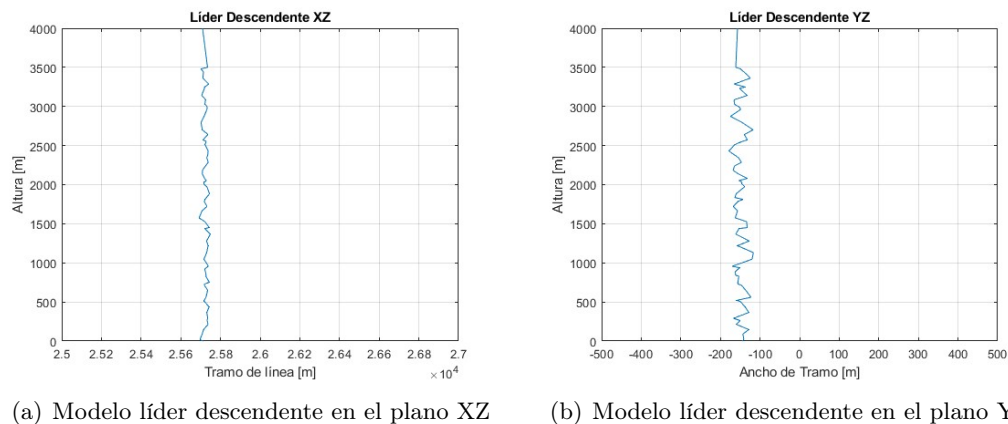


Figura 5.4: Modelo del líder descendente 3D. Elaboración propia.



(a) Modelo líder descendente en el plano XZ

(b) Modelo líder descendente en el plano YZ

Figura 5.5: Modelo del líder descendente en planos 2D. Elaboración propia.

El modelo aplicado a 500 rayos, posee aleatoriedad en los puntos de origen y final del líder descendente. Como es de esperar, no todos los líderes descendentes logran llegar al proceso de unión con un líder ascendente originado desde los conductores. En la Figura 5.6 se muestran los puntos finales de líderes descendentes para el MLP tradicional en la región de Valparaíso. Los puntos en azul corresponden a líderes que se unieron con líderes ascendentes proveniente de conductores de la torre. (DMR o Polo).

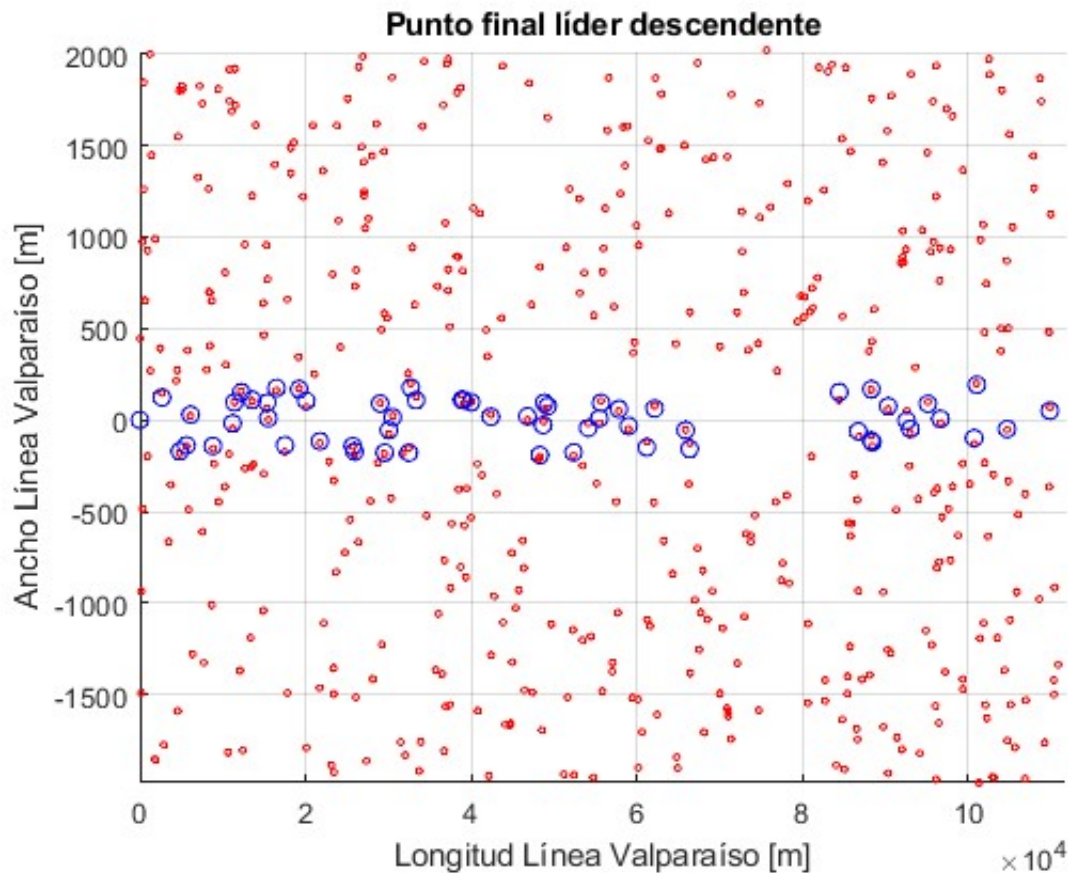


Figura 5.6: Coordenadas finales del líder ascendente. Elaboración propia.

5.2.2. Respecto a las corrientes de rayo

La Tabla 5.5 indica la cantidad de impactos y magnitud de la corriente en [kA] de los rayos sobre los conductores de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre estudiada.

Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Numero de impactos	58	57	53	57	53	55
I_{min} [kA] promedio	50.90	48.15	55	58.6	52.2	54.54
I_{max} [kA] promedio	200	200	200	200	200	200
Nº impactos con $I_{min} < I_{crit}$	13	12	6	8	7	8
Nº impactos con $I_{min} \geq I_{crit}$	45	45	47	49	46	47

Tabla 5.5: Numero de impactos y sus corrientes para el MLP.

De la Tabla 5.5 se infiere, que el numero de impactos para el modelo aplicado por zona ronda en un 11 % de impactos de los 500 rayos simulados. De un total de 3000 rayos, se considera que para el total de línea, unos rayos 333 impactaran sobre los conductores y 279 generarán flameo en aisladores. Esto se debe a que no todas las corrientes mínimas superan en el valor de corriente crítica I_{crit} .

En la simulación, los valores mínimos de corriente que provocaron impactos fueron de 3 [kA] en la Región Metropolitana, 4 [kA] en Antofagasta, Diego de Almagro y Coquimbo,

y 5 [kA] en Atacama y Valparaíso.

A continuación, en la Tabla 5.6 se presentan los conductores en los cuales impactan los rayos a la línea HVDC, según la zona.

Impactos/zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Polo positivo	29	29	25	29	30	31
Polo negativo	18	21	22	23	21	23
DMR polo +	11	6	5	5	1	1
DMR polo -	0	1	1	0	1	0

Tabla 5.6: Impactos sobre conductores aplicación del MLP tradicional sobre la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre.

En toda la longitud de la línea, se observa que la mayoría de los impactos a conductores ocurren en el conductor de polo positivo, representando el 51 % de las descargas atmosféricas, seguido por el polo negativo con aproximadamente un 38 %. Los impactos a los cables de DMR representan alrededor del 11 %. Cabe destacar que, aunque los DMR no funcionan nominalmente como conductores, como lo hacen los polos, pueden transmitir energía en situaciones de desbalance operativo inherente a la línea. En condiciones de falla, los DMR pueden ser habilitados como reemplazo del polo.

En el caso de Antofagasta cerca de un 80 % de los impactos ocurren en polos, a diferencia de la región metropolitana donde es prácticamente el 98 %. Estos datos son de importancia ante las distintas operaciones que puede llevar la línea.

5.2.3. Tasas de falla por apantallamiento

En la Tabla 5.7 se indican las tasas de falla de apantallamiento anual y la tasa de flameo anual por falla de apantallamiento para cada una de las zonas analizadas pertenecientes al proyecto Kimal-Lo Aguirre.

Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
SFR promedio tradicional [impactos de rayo/100km·año]	0.28	0.137	0.111	0.0906	0.0748	0.091
SFFOR promedio tradicional [flameos por impacto de rayo/100km·año]	0.271	0.132	0.108	0.088	0.073	0.088
SFR promedio tradicional [impactos de rayo/año]	1.168	0.141	0.342	0.340	0.083	0.067
SFFOR promedio tradicional [flameos por impacto de rayo/año]	1.131	0.136	0.333	0.330	0.081	0.065

Tabla 5.7: Resultados aplicación del MLP para la estimación de fallas de apantallamiento.

Para las zonas de Antofagasta, Diego de Almagro y Atacama los valores de SFFOR [flameos por impacto de rayo/100km·año] superan el límite aceptable de 0.1[flameos por impacto de rayo/100km·año] sugerido por IEEE [37]. En tanto Coquimbo, Valparaíso y la región Metropolitana, están sobre el valor de diseño apropiado de 0.05[flameos por impacto de rayo/100km·año].

La suma de los valores de SFFOR para la línea Kimal-Lo Aguirre es de 2.07[flameos por impacto de rayo/año], es decir ocurrirán anualmente para los 1388 [km] de longitud de la línea dos escenarios de flameo con origen de DEAT debido a la falla de apantallamiento. El SFR total es de 2.14[impactos de rayo/año], por lo que es valido aproximar que todo

evento anual de impacto sobre conductores en la línea ocasionara flameo en la cadena de aisladores. El valor estandarizado de SFFOR para la línea es de 0.149[flameos por impacto de rayo/100km·año], por lo que el apantallamiento resulta ser ineficiente según IEEE [37].

Como es de esperarse, los valores de SFR obtenidos son mayores a los valores de SFFOR, debido a que en la simulación, se produjeron impactos con corrientes inferiores a las corrientes críticas. Sin embargo las diferencias porcentuales entre ambas tasas oscilan entre 2.4 % a 3.65 %.

Para ambas tasas no estandarizadas, la región de Antofagasta presenta los valores más altos, lo que indica que esta es la zona del trazado del proyecto con mayor susceptibilidad a impactos por DEAT en sus conductores. Esto se debe principalmente a la mayor cantidad de días de tormenta promedio (14) en comparación con el resto de la línea. En contraste, las regiones de Valparaíso y Metropolitana presentan índices más favorables, atribuibles a un menor recorrido de los conductores en el tramo proyectado y a un número inferior de días de tormenta promedio.

5.2.4. Tensión de la punta del líder descendente

Como se aprecia en la Figura 5.7, a medida que el líder cae a la superficie, se produce acumulación de carga por cada paso en que este incurre. La tensión de la punta es de carácter negativo, con un crecimiento no constante en cada paso, debido a la aleatoriedad en la longitud del paso descendente

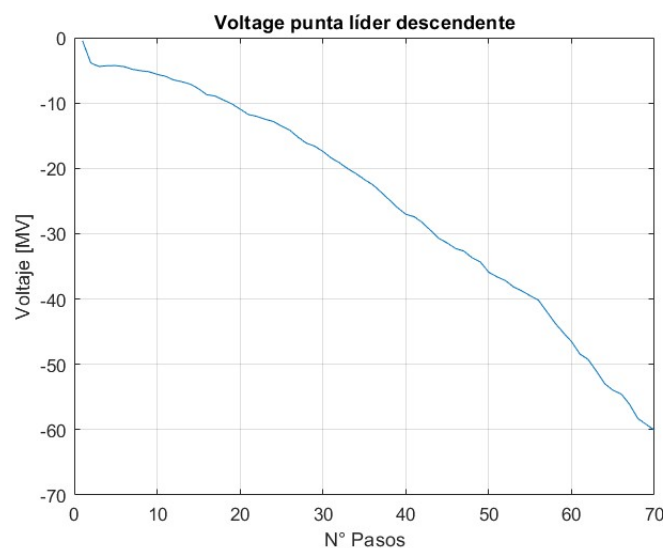


Figura 5.7: Tensión Punta Líder Descendente. Elaboración propia.

5.2.5. Evaluación mejorada del SFFOR para MLP

En la Tabla 5.8 se presentan los valores obtenidos para SFFOR[rayos/año] de la línea HVDC considerando la primera mejora al modelo de líder progresivo. Para ello tras la identificación de los impactos sobre los conductores de la línea, se procede a recalcular el SFFOR correspondiente a la descarga, considerando la nueva corriente crítica que es dependiente de la tensión del conductor, como se indica en la ecuación (3.43).

Zona	Antofagasta	Diego De Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
SFFOR [flameos por impacto de rayo/100km·año]	0.274	0.130	0.108	0.089	0.073	0.089
SFFOR [flameos por impacto de rayo/año]	1.143	0.134	0.333	0.334	0.081	0.065

Tabla 5.8: Valores de tasa de flameo por falla de apantallamiento para evaluación de tasa mejorada del MLP.

El valor total de SFFOR para la línea Kimal-Lo Aguirre es de 2.09[flameos por impacto de rayo/año], con valor estandarizado de 0.151[flameos por impacto de rayo/100km·año], el apantallamiento del trazado total de la línea es deficiente al superar el límite de 0.1[flameos por impacto de rayo/100km·año] [37].

Como se puede apreciar, respecto a los valores obtenidos en la Tabla 5.7, la diferencia es muy pequeña entre los resultados. La principal razón de ello, se debe al orden de magnitud de las corrientes que generaron impacto. La gran mayoría de las corrientes mínimas de rayo superaban incluso al nuevo valor de corriente crítica I_{cr*} [kA], para el calculo del SFFOR según 5.1. Si la corriente mínima obtenida, es mayor al valor de corriente crítica, la evaluación de las tasas parten desde ese valor de corriente, como limite inferior de integración.

Para las zonas de Antofagasta, Diego de Almagro y Atacama los valores de SFFOR[flameos por impacto de rayo/100km·año] superan el límite aceptable de 0.1[flameos por impacto de rayo/100km·año] sugerido por la IEEE [37]. En tanto en Coquimbo, Valparaíso y la región Metropolitana, están sobre el valor de diseño apropiado de 0.05[flameos por impacto de rayo/100km·año].

$$SFFOR = 0.1\gamma T_d A_d \int_{I_{cr*}}^{I_{max}} P(I) dI \quad (5.1)$$

5.2.6. Evaluación mejorada del líder ascendente para MLP

Considerando el MLP actualizado según los principios indicados en la Sección 3.4.2 y la metodología explicada en la Sección 4.4.5 los resultados obtenidos se indican en las Tablas 5.9, 5.10 y 5.11.

Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Numero de impactos	115	134	135	132	132	133
I_{min} [kA] promedio	49.67	37.01	39.27	38.87	39.03	45.28
I_{max} [kA] promedio	200	200	200	200	200	200
N° impactos con $I_{min} < I_{crit}$	26	45	41	41	42	34
N° impactos con $I_{min} \geq I_{crit}$	89	89	94	91	90	98

Tabla 5.9: Numero de impactos y sus corrientes para el MLP actualizado.

Impactos/zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
Polo positivo	101	103	117	114	116	116
Polo negativo	14	31	17	17	15	15
DMR polo +	0	0	0	0	0	0
DMR polo -	0	0	1	1	1	1

Tabla 5.10: Impactos sobre conductores aplicación del MLP actualizado sobre la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre.

Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
SFR [impactos de rayo/(100km·año)]	0.417	0.286	0.277	0.213	0.183	0.181
SFFOR [flameos por impacto de rayo/(100km·año)]	0.385	0.243	0.185	0.159	0.158	0.165
SFR [impactos de rayo/año]	1.740	0.295	0.854	0.798	0.203	0.133
SFFOR [flameos por impacto de rayo/año]	1.606	0.251	0.570	0.596	0.175	0.121

Tabla 5.11: Resultados de las distintas tasas de falla de apantallamiento del MLP actualizado.

Los resultados en Antofagasta son considerablemente mayores respecto a las demás regiones. Bajo este modelo, todas las zonas evaluadas poseen un estado de apantallamiento deficiente, pues superan el valor límite de $0.1[\text{flameos}/(100\text{km}\cdot\text{año})]$ de la IEEE [39]. En lo que respecta al número de impactos anuales, la sección del trazado del proyecto ubicado en la región de Antofagasta, se verá afectada por aproximadamente 17 impactos en conductores, en una década de operación.

El mayor decrecimiento de SFFOR respecto a SFR se observa en Atacama con un 33.2%, mientras que el menor decrecimiento se da en Antofagasta con un 7.7%. Esto indica una mayor concentración de rayos de menor amplitud de corriente en Antofagasta. En esta región, se registra la mayor corriente mínima promedio ($49.67[\text{kA}]$) y la menor cantidad de impactos de rayos con corrientes inferiores al valor crítico (26 impactos). Estos resultados sugieren directrices sobre el estado de apantallamiento deficiente bajo el MLP aplicado.

Las relaciones de impactos obtenidos entre polos positivo y negativo varían de una región a otra. Por ejemplo, Antofagasta presenta una relación de aproximadamente 7.21, indicando que por cada 7 impactos sobre el polo positivos hay uno en el polo negativo. Lo mismo se puede indicar en Atacama y Coquimbo con relaciones cercanas de 6.88 y 6.71 respectivamente. Valparaíso y la Región Metropolitana poseen con relaciones de 7.73.

En el análisis de impactos para la zona de Diego de Almagro. La relación obtenida, se aleja de la relación ideal de 1 impacto en el polo negativo y 7 impactos en el polo positivo. Su principal justificación, recae en la disposición de los conductores. A pesar de esta excepción, el MLP actualizado cumple de buena forma mejorar la representación de la atracción del polo positivo para impactos en las líneas de transmisión de wxtra alta tensión.

Al igual que en MLP convencional, en la región de Antofagasta, los índices SFR Y SFFOR, respecto a las otras regiones. muestran los valores más altos, ello indica que Antofagasta, es la zona más propensa a impactos por descargas eléctricas atmosféricas (DEAT) en sus conductores. Esto se debe principalmente a que tiene la mayor cantidad de días de tormenta promedio (14), en comparación con el resto de la línea. En contraste, las regiones de Valparaíso y Metropolitana muestran índices inferiores, debido a que, los conductores del tramo proyectado, tienen menor longitud y se enfrentan a menos cantidad

de días de tormenta al año.

El valor total de las tasas de falla de apantallamiento bajo este modelo, evaluado con una simulación de 500 rayos aleatorios por zona trazada, es de 4[impactos de rayo/año]. El valor de SFFOR para el proyecto Kimal-Lo Aguirre es de 3.32[flameos por impacto de rayo/año], con valor estandarizado de 0.24[flameos por impacto de rayo/(100km·año)]. Esto muestra que los resultados obtenidos superan el límite de aceptabilidad sugerido por la IEEE de 0.1 [37].

Los valores obtenidos en este modelo actualizado, fueron mayores a los obtenidos bajo aplicación del MLP tradicional. La cantidad anual de impactos en la línea se vio duplicada. Respecto al valor obtenido de SFFOR [flameos/año] total, este, es un 70 % mayor. En valores estandarizados, se paso de un valor de SFFOR [flameos/(100km,año)] de 0.15 en el MLP tradicional a 0.24 flameos por impactos de rayo por cada 100 kilómetros de línea anuales.

5.3. Comparación entre modelos tradicionales

A continuación, en la Tabla 5.12, se entrega una comparación entre los resultados obtenidos, para las tasas anuales de falla de apantallamiento y de flameo por falla de apantallamiento según el modelo aplicado.

Parámetros/Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R.M.
SFR MEG [impacto de rayo/año]	0.02	0.009	0.037	0.022	0.008	0.007
SFR MLP [impacto de rayo/año]	1.168	0.141	0.342	0.339	0.083	0.067
SFFOR MEG [flameos por impacto de rayo/año]	No aplica	0.003	0.023	0.013	0.005	0.004
SFFOR MLP [flameos por impacto de rayo/año]	1.131	0.136	0.333	0.329	0.081	0.064

Tabla 5.12: Resultados aplicación de MEG Y MLP para obtención de tasas anuales de falla de apantallamiento y de flameo por falla de apantallamiento.

De la Tabla 5.12, se obtiene un valor de (**SFR**) total para la línea de 0.1029[impacto de rayo/año] para el modelo electro-geométrico. En tanto para el MLP el SFR obtenido fue de 2.14[impactos de rayo/año]. Esto indica que el MEG, estima una cantidad mucho menor de impactos de rayo por año, en comparación con el MLP.

Respecto al SFFOR, es importante señalar, que para la zona de Antofagasta en el MEG, al contar una corriente crítica superior a la máxima, no se presentarían fallas que lleguen a flameo. Es decir ángulo de apantallamiento tiende al valor de ángulo de apantallamiento perfecto. Sin embargo para el MLP, se obtuvo un valor en esta zona de 1.131[flameos por impacto de rayo/año] o 0.271[flameos por impacto de rayo/100km,año], valor que no cumple el nivel límite aceptable sugerido por IEEE de 0.1[flameos por impacto de rayo/100km·año] [37].

Mediante el MEG, se obtienen tasas anuales de flameo a causa de falla de apantallamiento más bajos en comparación al MLP. El valor obtenido mediante MEG para toda la línea es de 2.07[flameos por impacto de rayo/año], en tanto el MLP tiene solo 0.05[flameos por impacto de rayo/año], lo que es 40 veces menor.

Para el MLP, la Región Metropolitana presentó los menores valores de SFR (impactos de rayo/año) y de SFFOR (flameos por impacto de rayo/año). A pesar de tener más días de tormenta en comparación con Coquimbo y Valparaíso, su tramo de corta longitud contribuye a estos resultados favorables.

5.4. Resultados en estado de emergencia

En la Tabla 5.13 se resumen los resultados obtenidos para las tasas de flameo por falla de apantallamiento.

Parámetros/Zona	Antofagasta	Diego de Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	R,M,
SFFOR MEG actualizado [flameos por impacto de rayo/año]	0.005	0.0055	0.0285	0.0166	0.0062	0.005
SFFOR MEG tradicional [flameos por impacto de rayo/año]	No aplica	0.0034	0.0231	0.0134	0.005	0.004
SFFOR MLP actualizado [flameos por impacto de rayo/año]	1.1556	0.1373	0.3390	0.3373	0.0833	0.0668
SFFOR MLP tradicional [flameos por impacto de rayo/año]	1.1306	0.1362	0.3329	0.3298	0.0810	0.0646

Tabla 5.13: Resultados aplicación de MEG Y MLP para obtención de tasas de flameo por falla de apantallamiento ante condición de emergencia.

Para el MEG actualizado, los DMR no aportan en la evaluación de los arcos de captación de DEAT. Ello se debe a que se encuentran superpuestos por los arcos provenientes de los cables de guarda y de los polos para todo el rango de corrientes evaluado [2 [kA], I_{max}]. La evaluación utilizando el MEG, se segmentó en dos partes mediante la simetría de la torre, analizando la condición de cada circuito de polo por separado.

El valor de la tasa de flameo por falla de apantallamiento para el MEG actualizado en la totalidad de la línea es de 0.067[flameos por impacto de rayo/año]. En tanto en el MEG tradicional se tiene 0.049[flameos por impacto de rayo/año]. De acuerdo a [37], un diseño correcto para la línea debe poseer un valor menor a 0.05[flameos por impacto de rayo/100km·año], es decir para los 1388[km], menos de 0.7[flameos por impacto de rayo/año]. Por lo que la línea, a pesar de operar en estado de falla, cumple con tener un apantallamiento adecuado. Todas las zonas cumplen con poseer un valor inferior a 0.05[flameos por impacto de rayo/(100km·año)]. Se obtuvo un SFFOR 37 % mayor (0.0181[flameos por impacto de rayo/año] más) respecto al MEG tradicional para la línea.

Como es de esperar, los resultados en el MEG actualizado para todas las zonas, son mayores a los obtenidos en el modelo tradicional, razón de ello se debe a la incorporación de la tensión de polo en el cálculo de I_{crit} según la ecuación (3.43), lo que conlleva a obtener un rango de corrientes mayor.

Comparando resultados del MEG en zonas e ignorando el incremento absoluto de Antofagasta, donde ya se cuenta con un índice de flameo, el mayor incremento entre MEG tradicional y actualizado, se dio en Diego de Almagro con un 62 %, en tanto el menor incremento fue en Atacama con un 23.4 %. Por lo que ante escenarios de emergencia, el desempeño en el apantallamiento de la zona de Diego de Almagro se ve más alterada.

Para el MLP con evaluación mejorada de SFFOR, los DMR aportan en la evaluación debido a que existen DEAT modelados tridimensionalmente que logran impactar sobre estos cables. Su evaluación considera el potencial en que se encuentran operando ante la condición descrita de falla.

Los valores de los SFFOR obtenidos en el MLP tradicional para toda la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre es de 2.07 [flameos por impacto de rayo/año]. Según las normas de la IEEE [37], para los 1388 km de la línea, este valor debería ser inferior a 0.7 [flameos por impacto de rayo/año]. Por lo tanto, no cumple con las condiciones mínimas requeridas para ser considerado un apantallamiento aceptable.

Los resultados obtenidos con el MLP con evaluación mejorada son levemente mayores a los obtenidos con la evaluación de MLP tradicional. Con un incremento promedio para las zonas evaluadas de un 2.2 %. La razón principal de ello se debe a los niveles de corriente que impactaron sobre los conductores y la cambio en el valor de corriente crítica del DMR. El apantallamiento obtenido con el MLP actualizado, es deficiente por las razones indicadas en el MLP tradicional.

La disparidad en los resultados entre los modelos actualizados (electro-geométrico y líder progresivo), de aproximadamente 2[flameos por impacto de rayo/año], señala una variación sustancial en las tasas evaluadas. Donde las obtenidas con métodos electro-geométricos resultaron despreciables. Al ser los MLP más completos, se refuerza la necesidad de otorgar tridimensionalidad al modelado de rayo para el análisis de impactos de rayo.

En la Tabla 5.14 se dan a conocer las corrientes críticas calculadas para el DMR1.

Zona	Antofagasta	Diego De Almagro	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	RM.
I_{crit} [kA]	8.8	8.6	8.4	8.4	8.4	8.4

Tabla 5.14: Corrientes críticas para el conductor DMR (+) energizado en 75[kV].

Las corrientes críticas para el DMR1 (sección polo positivo) energizado a 75[kV], rondan entre los 8.4 a 8.8[kA], siendo la torre S6KL, la cual posee menor valor debido a ser la torre representativa con mayor altura. Este factor incide en tener tasas más elevadas de falla. Sin embargo, necesita ser considerado junto con otros factores para una conclusión completa.

5.5. Tiempos de simulación

En esta sección se entregan los tiempos de simulación efectuados para el análisis de apantallamiento de la región Metropolitana mediante el MEG y los MLP. La Tabla 5.15, entrega los tiempos requeridos para la simulación. Las simulaciones fueron efectuadas mediante el programa MATLAB en su edición r2024a, en un computador Lenovo 81WD.

	MEG	MLP	MLP actualizado
Tiempo de simulación [s]	5	4657	123750

Tabla 5.15: Tiempos de simulación de los MEG Y MLP.

Capítulo 6

Resumen final y conclusiones.

Según el modelo seleccionado para la evaluación del SFR, los resultados obtenidos varían considerablemente entre sí, al igual que lo es el tiempo de simulación requerido para cada modelo. Por ejemplo, el MEG ofrece resultados en segundos, mientras que el MLP tradicional puede tardar horas, y los modelos de líder progresivo actualizados pueden requerir días para completar su simulación.

Para los resultados obtenidos mediante la aplicación del MEG, se obtuvo un SFR de 0.1029[impactos/año]. Es decir, la línea en su totalidad se verá impactada una vez por década a causa de una DEAT. Para los impactos que causan flameo, estos cumplen con el estándar internacional de diseño correcto de SFFOR inferior a 0.05[flameos por impacto de rayo/100km·año] sugerido por la IEEE. Por lo tanto, utilizando el MEG, se puede concluir que el estado de apantallamiento es satisfactorio. Al evaluar por región, todas cumplen con poseer la norma señalada. El MEG actualizado obtiene valores similares, por lo que, se mantiene un apantallamiento apropiado.

Para toda la línea, las corrientes críticas obtenidas para cada una de las torres representativas cumplen con el nivel mínimo de corriente de 5[kA]. Esto destaca la efectividad del radio equivalente presente, que depende de la disposición de los conductores que forman los polos y de los componentes de las cadenas de aisladores, influyendo en el valor de la tensión crítica de flameo ante un impulso negativo.

Los ángulos de apantallamiento para las tres torres representativas escogidas para la línea, cumplen con lo recomendado en la norma IEEE, pues todos los ángulos son inferiores a 30 grados. En el caso de la torre representativa de la región de Antofagasta, el valor del ángulo de apantallamiento, se acerca bastante al ángulo de apantallamiento perfecto. Por lo es valido concluir que, se tiene una tasa anual de flameo por fallas de apantallamiento con valor cero. Sin embargo, la aplicación del MEG, depende de los parámetros A y B , los cuales varían según publicación.

Considerando que el MEG es de aplicación expedita, es importante comentar una serie de mejoras a considerar para la evaluación de apantallamiento de cualquier línea de transmisión. Entre ellas se tiene el uso de diferentes valores para los parámetros A , B y γ , dividir con mayor exactitud las zonas de evaluación según las diferentes torres y configuraciones representativas, reconocer trazados con suelo inclinado e incorporar la variación de los días de tormenta según el año.

La comparación de SFR estandarizados para distintas torres bajo parámetros iguales y mismos días de tormenta, permiten evaluar adecuadamente el estado de apantallamiento para las distintas disposiciones de los conductores y el cable de guarda (sensibilidad). En este trabajo, tras comparar los resultados obtenidos en Diego de Almagro y Atacama, se concluye que implementación de torres GR6KL favorece la protección de la línea frente a impactos por DEAT en comparación a las torres S6KL.

En lo que concierne a la disposición del DMR, esta no influye en la evaluación del MEG. Esto se debe a que su arco expuesto a lo largo de toda la línea y el espectro de corrientes consideradas por el método están cubiertos por los arcos provenientes del cable de guarda y los polos. Por lo tanto, no se ve afectado por los rayos verticales descritos en el MEG.

Para el MLP tradicional se obtuvo un SFR para toda la línea fue de 2.14[impactos de rayo/año] y un SFFOR estandarizado de 0.149 [flameos por impacto de rayo/100km·año]. Por lo que el estado de apantallamiento de la línea es deficiente, al superar el límite de aceptabilidad propuesto por la IEEE de 0.01[flameos por impacto de rayo/100km·año]. Evaluando por zonas, el apantallamiento es aceptable en: Coquimbo, Valparaíso y en la región Metropolitana.

Para el análisis de apantallamiento mediante el MLP actualizado en el criterio de unión de los líderes, se obtuvo un SFFOR estandarizado de 0.24[flameos por impacto de rayo/100km·año]. Por lo que, el apantallamiento nuevamente resulta deficiente. A diferencia de los resultados obtenidos por zonas en el MLP tradicional, en todas las zonas el apantallamiento resulta deficiente. Entre ambos MLP aplicados, se mantiene la tendencia de que los mayores valores se presentan en Antofagasta, para los SFR y SFFOR obtenidos.

Las principales diferencias entre los modelos surgen de la consideración de la tortuosidad y la aleatoriedad del rayo, lo que introduce una dimensión tridimensional en el análisis de apantallamiento. Además, la representación más precisa de los conductores mediante la catenaria explica los impactos observados en los retornos metálicos dedicados (DMR) para el MLP, en contraste con el MEG, donde estos, no eran factor de análisis. Los resultados de SFR Y SFFOR obtenidos en MLP son considerablemente mayores que los obtenidos con MEG. Como ejemplo, se tiene la cantidad de impactos de rayos anuales en el total de la línea, el MEG tradicional indica 0.1 impactos, en tanto el MLP indica 2 impactos, es decir, la cantidad de impactos en la línea es 20 veces mayor en el MLP.

Las corrientes que afectan directamente a la línea de transmisión según MLP, superan los niveles que permiten un impacto según MEG. En el MEG, las corrientes no superan los 20[kA], mientras que en el MLP, se considera que pueden llegar hasta los 200[kA].

En el análisis de operación de emergencia, es crucial tener en cuenta que en los modelos tradicionales MEG y MLP, los conductores son considerados elementos pasivos. Por lo tanto, su potencial a tierra y corriente no influyen en los resultados de las tasas de falla de apantallamiento, excepto en situaciones donde se elimine un conductor en una parte significativa de la red. La manera adecuada de evaluar el estado de apantallamiento de una línea en falla, radica en el uso de métodos de evaluación que incorporen la tensión de la red, para determinar la corriente crítica o aplicar criterios de formación de líderes ascendentes.

Si bien en muchos trabajos que se han efectuado aplicando y comparado los MEG con los MLP, favorecen los resultados de estos últimos al acercarse a los eventos de impactos sobre las líneas estudiadas. Se deja abierto para futuros proyectos contrastar los impactos en la línea para cuando este entre en operación.

El análisis de líneas HVAC con MLP actualizado es recomendable para líneas de más de 500[kV] [47]. Sin embargo, considerando que el tiempo de simulación es significativamente mayor en el análisis HVDC, debido a que se deben incorporar la variación de la tensión en el tiempo, el análisis en líneas HVAC requiere de una evaluación en suficientes instantes de tiempo que representen adecuadamente su potencial. Los proyectos de instalación de nuevas líneas de transmisión a un sistema eléctrico tardan años en completarse, por lo que, con una organización adecuada, las evaluaciones mediante MLP actualizados son manejables.

A pesar de que el análisis de sensibilidad concluye que el uso estandarizado de torres GR6KL promedio es mejor que la disposición de torres S6KL en la evaluación de fallas por impactos. La disposición de torres y sus conductores también debe tener en cuenta factores climáticos, geográficos y sociales. para la instalación de torres de transmisión.

Si bien dentro de los modelos actualizados, se obtiene una aproximación más realista al registro histórico de impactos y un incremento en los valores de SFR Y SFFOR. Se debe tener en cuenta que el MLP aún se esta actualizando, por lo que su uso como estudio, no esta masificado.

Para la aplicación de los MLP actualizados a la fecha, todavía se requieren estudios para reforzar determinados fenómenos registrados en laboratorio, principalmente, los que inciden en la morfología del líder ascendente. Pues aspectos como la influencia de cuerpos aterrizados en la etapa de crecimiento del líder ascendente o según la clase de tensión de los conductores, son aspectos, que no influyeron en los resultados obtenidos en este documento, pues su integración, aún no ha sido formulada en alguna publicación.

Desafíos futuros:

Como trabajos futuros, se pueden sugerir, para cualquier proyecto de evaluación del grado de apantallamiento de cualquier línea de transmisión, el uso y comparación con técnicas numéricas como lo es el método de fractales. Efectuar comparativas del MEG empleando diferentes parámetros estudiados. También se deja abierto trabajar los MLP bajo criterios de evaluación que involucren el análisis de al corriente de retorno en conjunto al resto de etapas de formación de DEAT excluidas de esta tesis.

Bibliografía

- [1] J. Peralta. Licitación Ingternacional Proyecto HVDC Kimal Lo Aguirre. Octubre 2020.
- [2] L.Vaccaro J. Espinoza S.Reyes, L.Moran. Analysis of the chilean power system performance considering a long-distance hvdc transmission line. In *2023 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC)*, pages 1–6, 2023.
- [3] V. Rakov and M. Uman. *Lightning: physics and effects*. Cambridge university press, 2003.
- [4] N. Correa. Diseño del apantallamiento contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión con ayuda computacional. Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [5] V. Jimenez. Desempeño de líneas aéreas de transmisión frente a descargas eléctricas atmosféricas: análisis de la falla de apantallamiento en zonas de topografía montañosa. Tesis de maestría, Universidad de Columbia, 2013.
- [6] J. Rojido. Métodos de Ubicación del Cable de Guarda Para una Línea de 500kV. *Apunte Académico, Universidad Nacional de la Plata*, Octubre 2009.
- [7] IEEE. Guide for improving the lightning performance of transmission lines, 1997.
- [8] 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, 2006.
- [9] A. Rahiminejad R. Mohammadi, B. Vahidi. Estimation of hvdc transmission lines shielding failure using lpm method and an adapted slim model. *IET Science, Measurement Technology*, 13, 11 2019.
- [10] J. He, Xi Wang and R. Zeng. Evaluation of Leader Progression Model and EGM for Analysing Lightning Performance of Transmission Line. *CIGRE INDIA*, Octubre 2014.
- [11] J Montaña, F Lillo, D Pozo, C Younes, and A Alegria. Análisis del diseño actual del apantallamiento ante rayos de líneas aéreas de alta tensión de transelec analysis of lightning shielding design of high voltage overhead lines for transelec. *SICEL*, 2017.
- [12] C. Hirsching M. Kahl M. Suriyah M. Goertz, S. Wenig and T. Leibfried. Analysis of extruded hvdc cable systems exposed to lightning strokes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(6):3009–3018, 2018.

- [13] A. Rahiminejad B. Vahidi. Investigation of sinusoidal phase voltage effect on sfr calculation of hvac transmission lines. *Indian Journal of Science and Technology*, 2018.
- [14] Z. Fu B. Wai and H. Yuan. Analysis of lightning shielding failure for 500-kv overhead transmission lines based on an improved leader progression model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3):1433–1440, 2009.
- [15] Dirección de Planificación y Desarrollo. Propuesta de expansión de transmisión del sistema eléctrico nacional 2017. Technical report, Coordinador Eléctrico Nacional, 217.
- [16] SGA gestión ambiental. *Estudio de Impacto Ambiental*. Conexión Línea Kimal-Lo Aguirre, 2023.
- [17] Colegio de Ingenieros de Chile. 9a versión día de la ingeniería eléctrica. *WEBINAR*, 2022.
- [18] Conexión Energía. Pagina web conexión línea kimal-lo aguirre, 2023. Accessed on April 11, 2024.
- [19] V. Arias. *Corredores Híbridos Para Líneas de Transmisión AC/DC*. Memoria de titulación ingeniera civil electricista, Universidad De Chile, Septiembre 2020.
- [20] G. Olguín. Taller de capacitación transmisión en corriente continua de alto voltaje hvdc, sesión 1., nov 2018. Noviembre 2018.
- [21] S. Tang. *The design and control of LVDC industrial power distribution systems*. University of Wisconsin–Madison, 1999.
- [22] J. Dwyer and M. Uman. The physics of lightning. *Physics Reports*, 534(4):147–241, 2014.
- [23] B. Meredith D. Proctor, R. Uytendogaardt. Vhf radio pictures of lightning flashes to ground. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D10):12683–12727, 1988.
- [24] M. A. Uman. *The lightning discharge*. Courier Corporation, 2012.
- [25] J. Kuffel and P. Kuffel. *High voltage engineering fundamentals*. Elsevier, 2000.
- [26] G. Silva and S. Visacro. Modeling the lightning-channel formation based on the bipolar leader theory by an electrostatic-by-step approach allowing representing non-regular ground surfaces for applications related to lightning protection. *Electric Power Systems Research*, 214:108876, 2023.
- [27] F. Peek. *Dielectric phenomena in high voltage engineering*. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1920.
- [28] CT Phelps. Field-enhanced propagation of corona streamers. *Journal of Geophysical Research*, 76(24):5799–5806, 1971.
- [29] F. Rizk. Switching impulse strength of air insulation: Leader inception criterion. *IEEE Power Engineering Review*, 9(10):60–61, 1989.

- [30] M. Becerra and V. Cooray. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(2):897–908, 2006.
- [31] T. Sánchez. El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología, 2002-09.
- [32] Z. Yu C. Zhuang J. He R. Zeng, Z. Li. Study on the influence of the dc voltage on the upward leader emerging from a transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(3):1674–1681, 2013.
- [33] J. He, X. Wang, R. Zeng. Evaluation of Leader Progression Model and EGM for Analysing Lightning Performance of Transmission Line. *CIGRE INDIA*, 2014.
- [34] J. He R. Zeng X. Wang, Z. Yu. Characteristics of upward leader emerging from a single-phase conductor with different voltage class. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(4):1833–1842, 2015.
- [35] Z. Yu R. zeng X. Wang, J. He and F. Rachidi. Influence of ground wire on the initiation of upward leader from 110 to 1000 kv ac phase line. *Electric Power Systems Research*, 130:103–112, 2016.
- [36] M. Uman. The art and science of lightning protection. page 50, 2008.
- [37] Ieee guide for improving the lightning performance of transmission lines. *IEEE Std 1243-1997*, pages 1–44, 1997.
- [38] CIGRE SC et al. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *CIGRE Technical Brochure*, 63, 1991.
- [39] Ieee guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines. *IEEE Std 1410-2010 (Revision of IEEE Std 1410-2004)*, pages 1–73, 2011.
- [40] A. Otto and H. Reader. Wideband and narrowband hvdc conductor corona test methods for radio noise prediction. *IEEE transactions on power delivery*, 25(4):2950–2957, 2010.
- [41] S. Zumarán. Comparación entre el modelo electro-geometrico y el modelo de líder progresivo para el estudio de apantallamiento de líneas aéreas de transmisión en minera doña inés de collahuasi, Junio 2020. Memoria de pregrado, UTFSM.
- [42] RD Hill. Tortuosity of lightning. *Atmospheric research*, 22(3):217–233, 1988.
- [43] R. Zeng J. Lee S. Chang Z. Guan H. Jinliang, Y. Yu. Numeral analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2):815–822, 2005.
- [44] M. Bank SM. Ahadi B. Vahidi, M. Yahyaabadi. Leader progression analysis model for shielding failure computation by using the charge simulation method. *IEEE transactions on Power Delivery*, 23(4):2201–2206, 2008.
- [45] Q. Yang T. Yuan M. Yang W. Sima, Y. Lim V. Rakob. An analytical method for estimation of lightning performance of transmission lines based on a leader progression model. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(6):1530–1539, 2014.

- [46] A. Rahiminejad R. Mohammadi, B. Vahidi. Estimation of hvdc transmission lines shielding failure using lpm method and an adapted slim model. *IET Science, Measurement & Technology*, 13(9):1345–1351, 2019.
- [47] A. Rahiminejad N. Baglou, B. Vahadi. Investigation of sinusoidal phase voltage effect on sfr calculation of hvac transmission lines. *Indian J. Sci. Technol*, 11(1):1–22, 2018.
- [48] I. Gallimberti. The mechanism of the long spark formation. *Le Journal de Physique Colloques*, 40(C7):C7–193, 1979.
- [49] Conexión Línea Kimal Lo Aguirre. Línea de transmisión eléctrica hvdc kimal-lo aguirre. estudio de impacto ambiental: Resumen ejecutivo, 2023.
- [50] Conexión Línea Kimal-Lo Aguirre. Estudio de impacto ambiental. línea de transmisión eléctrica hvdc kimal-lo aguirre. capitulo 8: Plan de prevención de contingencias y emergencias, 2023.
- [51] M. Nicora J. Ardila R. Schurch J. Montaña, C. Morales and D. Aranguren. Lightning activity over chilean territory. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(16):e2021JD034580, 2021.
- [52] J. Montaña S. Zumarán. An assessment of shielding failure rates in transmission lines: A comparative analysis between egm and the lpm. In *2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3)*, pages 1–6, 2023.
- [53] CEN. Informe mensual coordinador eléctrico nacional, Marzo 2024.
- [54] N. Hingorani, L. Gyugyi. Understanding facts. *IEEE Press*, 2000.
- [55] S.SinhaRoy. Evaluation of dc fault current in grid connected converters in hvdc stations, 2022.
- [56] INEL. ¿cuáles son las aplicaciones de la tencología de transmisión hvdc? *WORKSHOP*, 2023.
- [57] M.R.B. Tavakoli and B. Vahidi. Transmission-lines shielding failure-rate calculation by means of 3-d leader progression models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2):507–516, 2011.
- [58] AR. Hileman and CF. Wagner. The lightning stroke-ii. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 80(3):622–636, 1961.

Anexo A

Sobre el proyecto Kimal-Lo Aguirre

En la Figura A.1 se entrega un mapa con el trazado de la línea Kimal-Lo Aguirre. Se destacan en ella, las estaciones convertidoras de Kimal en el norte y Lo Aguirre en el sur.

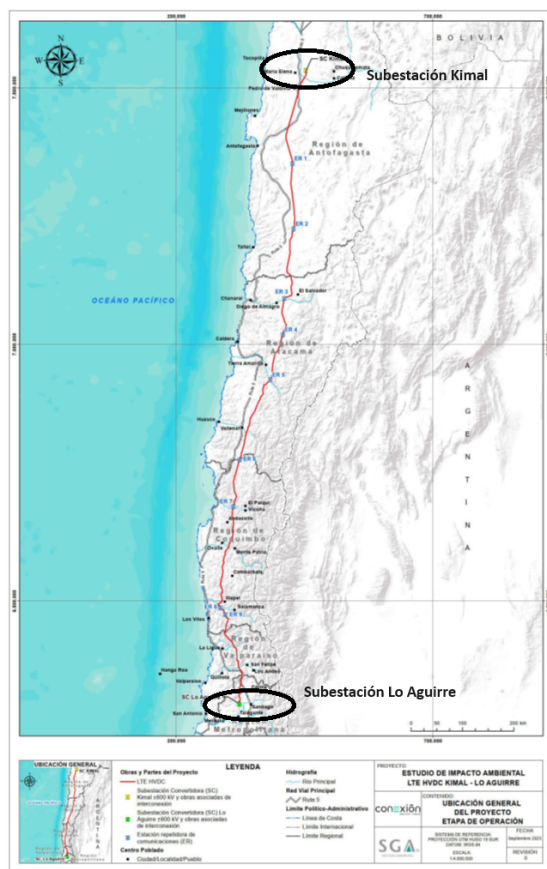


Figura A.1: Localización general del proyecto. [18]

La Figura A.2, ilustra las diferencias en las franjas de seguridad para líneas aéreas según tecnología de transmisión.

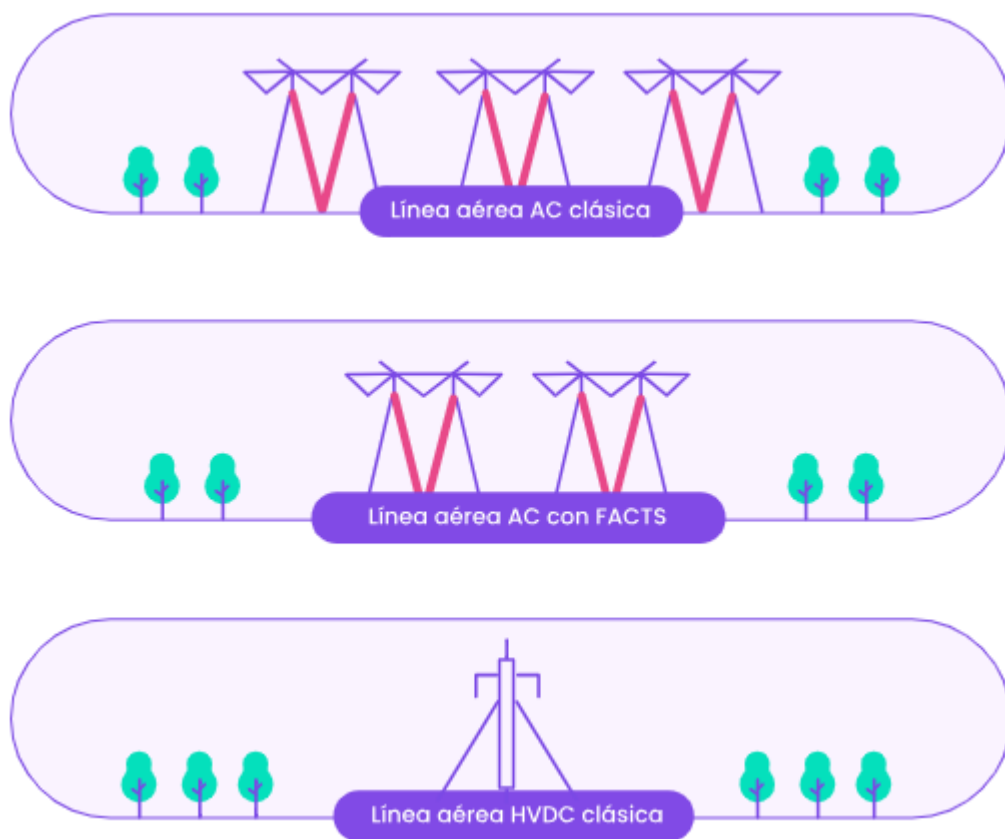


Figura A.2: Ilustraciones de franja de seguridad [18]

La figura B.1, entrega un diagrama unilineal simplificado correspondiente a la proyección del sistema de transmisión considerando la operación de la línea HVDC Kimal-Lo Aguirre.

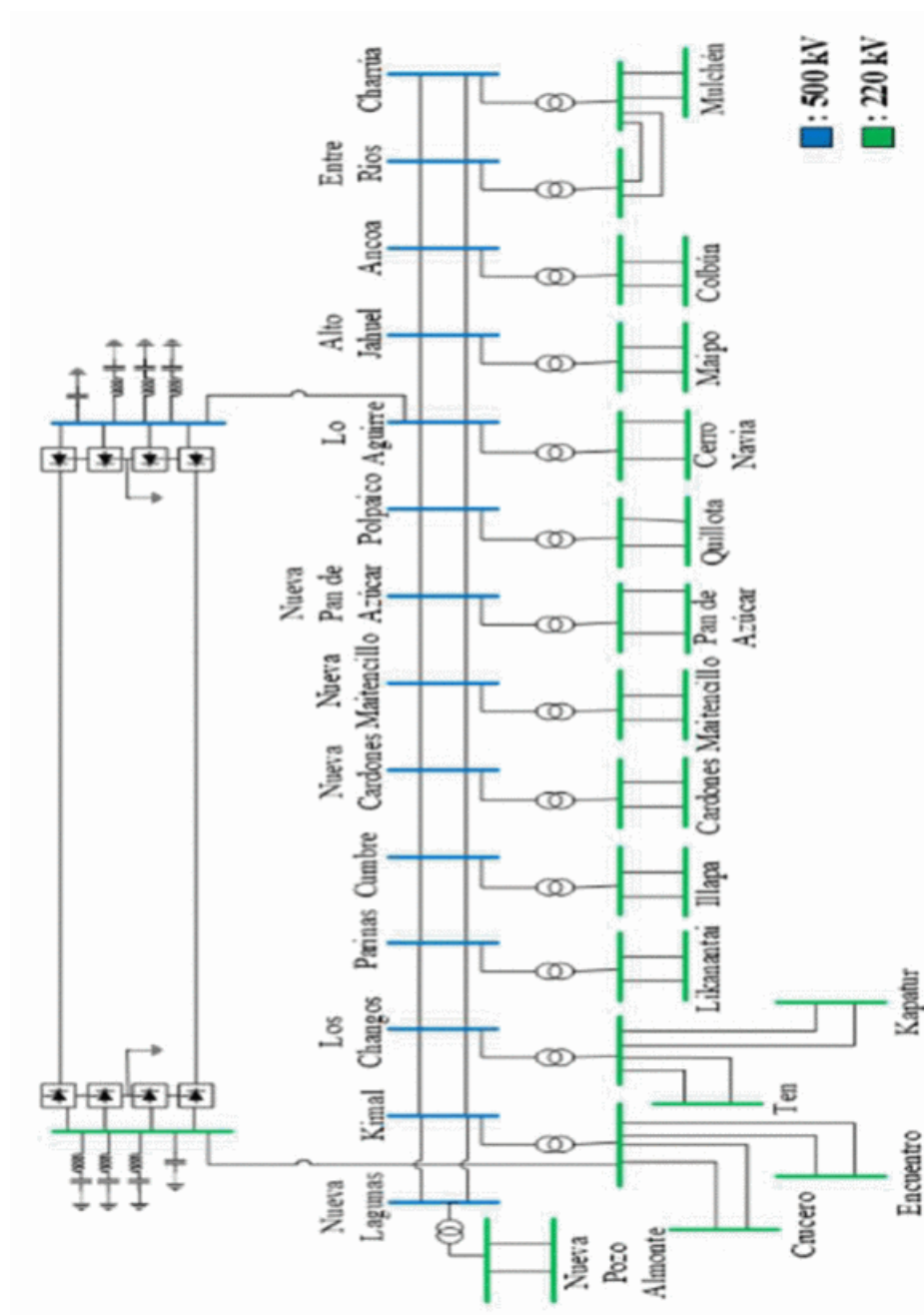


Figura A.3: Proyección del Sistema de Transmisión. [2]

Anexo B

Capacidad instalada

La Figura B.1 corresponde a una tabla perteneciente al Informe mensual del coordinador eléctrico nacional [53], la cual indica la capacidad instalada del SEN para marzo del vigente año.

Tipo de Tecnología	MW	[%]
Hídrica	7.396,5	22,1%
Embalse	3.395,3	10,1%
Pasada	4.001,2	11,9%
Térmica	13.393,9	40,0%
Gas Natural	5.030,8	15,0%
Carbón	4.331,9	12,9%
Diésel	3.230,9	9,6%
Otros Térmicos*	800,3	2,4%
Eólica	4.563,2	13,6%
Solar	7.943,7	23,7%
Termosolar	110,0	0,3%
Geotérmica	81,6	0,2%

* Otros térmicos: Biogás, Biomasa, Fuel Oil, Petcoke y Cogeneración.

Figura B.1: Capacidad del SEN marzo 2024. [53]

Anexo C

Tecnologías de conversión

El proyecto Kimal-Lo Aguirre al emplear tecnología de corriente continua de alta tensión, requiere que desde las subestaciones, se efectúe conversión desde y hacia los sistemas en corriente continua (conexión punto a punto). Para ello se disponen de distintas tecnologías de conversión [19] [54].

C.1. Convertidores tipo LCC

Son la tecnología clásica para HVDC. Emplea la conversión por medio del ajuste de válvulas con tiristores. Un convertidor de este tipo se caracteriza por el hecho de que el flujo de corriente siempre es unidireccional, permitiendo la reversa del flujo de potencia con la inversión de tensión. Dentro de estos convertidores el de uso más frecuente es el convertidor de línea conmutada LCC (*Line Commutated Converter*). Este convertidor requiere potencia reactiva de los sistemas de alterna [55].

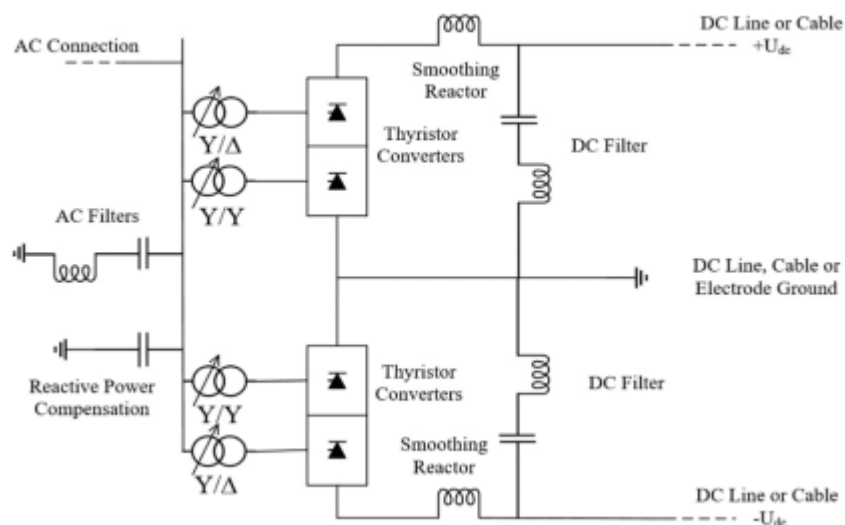


Figura C.1: Esquemático de tecnología LCC de 12 pulsos para línea HVDC bipolar. [55]

El proyecto Kimal-Lo Aguirre empleara tecnología LCC, debido a ser tecnología de menor costo, con amplio respaldo de uso en proyectos HVDC y ser compatible con la capacidad de transmisión planificada para la línea.

C.2. Convertidores tipo fuente de tensión

Los convertidores tipo fuente de tensión (tecnología VSC), corresponden a convertidores en los que la tensión del lado de corriente continua, mantiene una única polaridad. En tanto la reversión de corriente es la que permite la inversión de potencia. También se les conoce como tecnología de conmutación forzada, para ello utilizan elementos tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* [55]).

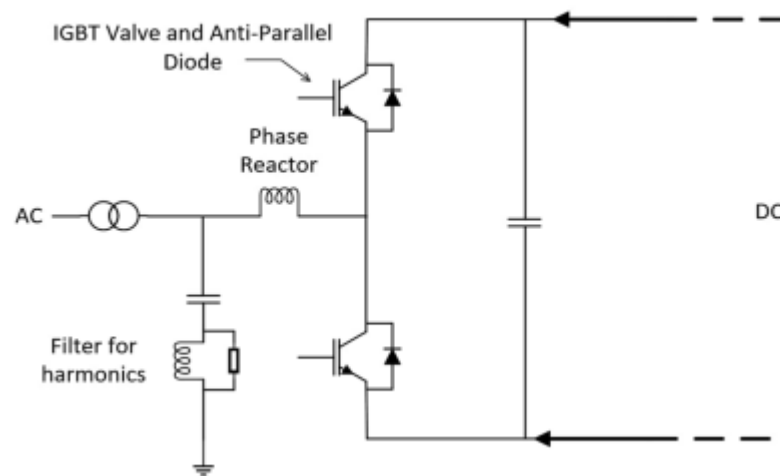


Figura C.2: Esquemático de tecnología VSC para línea HVDC. [55]

Entre las ventajas de los convertidores como fuente en tensión, se destaca su capacidad para realizar un control rápido de reactivos, e incluso inyectar los mismos ante evento de cortocircuito. menor dependencia o incluso la ausencia de necesidad de filtros de corriente alterna. Además son compactos [56].

Anexo D

Modelo de línea de transmisión

La línea HVDC Kimal-Lo Aguirre se emplaza en los modelos progresivos de forma tridimensional. Los conductores polo, guarda y DMR se trabajan en base a catenarias, entre torres representativas por zona y espaciadas. La Figura D.1 muestra la modelación de la catenaria entre dos torres por medio de líneas rectas verticales y horizontales. La coordenada $x[m]$, representa el punto del espacio a lo largo del trazado del proyecto de la línea. En tanto la coordenada $z[m]$ corresponderá a la altura de un punto del conductor. La catenaria entre dos torres obedece a las siguientes ecuaciones [57]:

$$z = h \cosh(b(\frac{D}{2} - x)) \quad (D.1)$$

$$b = \frac{2}{D} \ln \left| \frac{H - \sqrt{H^2 - h^2}}{h} \right| \quad (D.2)$$

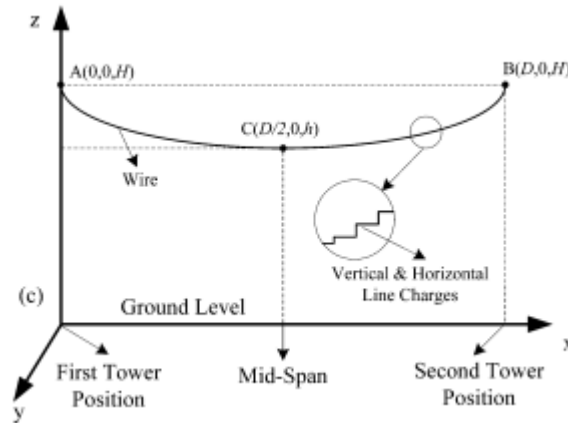


Figura D.1: Representación de catenaria entre torres. [57]

Donde,

- $h[m]$ altura en la mitad del vano para el conductor respectivo.

- $D[m]$ vano entre torres.
- $H[m]$ altura del conductor en la torre.

Para cada conductor de polo, guarda y DMR, se determina su altura, según el punto del trazado de la línea en que se encuentre. Estos puntos que recorren la línea, están equiespaciados según el ancho de captación de rayos $[m]$ de la zona. Esta altura (coordenada z) es registrada en una matriz que posee cantidad de columnas equivalente al número de polos, guarda y DMR, y cantidad de filas que representan el número de segmentos horizontales tomados que integran la longitud de la línea $+1$. A esta se le denominara como matriz *z-catenaria*.

Los puntos de espaciamiento a través de la coordenada x , se registraran en una matriz denominada *x-catenaria*. Esta matriz posee cantidad de columnas equivalente al número de polos, guarda y DMR, y una cantidad de filas que representan el número de segmentos horizontales $+1$.

Anexo E

Aplicación del MEG en Antofagasta bajo parámetros de Wagner y Hilleman

La corriente máxima obtenida para Antofagasta con el MEG I_{max} [kA] con la ecuación (3.19) posee un valor mayor a la corriente crítica I_{crit} [kA], por lo que el análisis del SFFOR se ve limitado. Los parámetros empleados A , B y γ son sugeridos dependiendo del autor. En este trabajo se emplearon $A=10$, $B=0.65$ y $\gamma=1$ en base [39] [37]. Wagner y Hilleman proponen distintos valores para estos parámetros adimensionales $A=14.2$, $B=0.42$ y $\gamma=1$ [58].

Tras aplicar el MEG con el cambio a los parámetros presentados y manteniendo los principios de la sección 3.2 y la metodología de la sección 4.3. Se obtuvieron los siguientes resultados.

	Antofagasta (Wagner y Hilleman)
SFR	0.04
SFR_{st}	0.01
$SFFOR$	0.013
$SFFOR_{st}$	0.003
Corriente crítica [kA]	10.6
Corriente máxima [kA]	15.96

Tabla E.1: Resultados MEG Antofagasta con parámetros de Wagner y Hilleman

El incremento de corriente máxima de 10.27 a 15.96, permite calcular adecuadamente la tasa anual de flameos por fallas de apantallamiento. Los valores de la tasa anual de falla de apantallamiento se vieron duplicados respecto a los resultados obtenidos con los parámetros sugeridos por norma [39], [37].

En este anexo, se muestra el diagrama de flujo, correspondiente a la aplicación del modelo del líder progresivo, para la detección de fallas de apantallamiento. La Figura 4.5, ilustra la metodología de la sección 4.4.4.