UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DISEÑO DE ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS DE TRANSMISIÓN EN CORRIENTE CONTINUA MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

MANUEL ALEJANDRO PALM LEITON

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DISEÑO DE ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS DE TRANSMISIÓN EN CORRIENTE CONTINUA MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

MANUEL ALEJANDRO PALM LEITON

PROFESOR GUÍA:
NELSON OMAR MORALES OSORIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GABRIEL MAURICIO OLGUÍN PARADA
LEOPOLDO ANDRÉS VALLEJOS HIDALGO

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: MANUEL PALM LEITON
FECHA: 22/08/2012
PROF.GUÍA: NELSON MORALES OSORIO

Diseño de electrodo de puesta a tierra para sistemas de transmisión en corriente continua mediante método de elementos finitos

El objetivo general del presente trabajo de título es presentar una metodología de diseño para un sistema de electrodos de una línea de transmisión en corriente continua. Se identificarán las etapas y lineamientos generales involucrados en el diseño de electrodos para este tipo de aplicación específica con el fin de entregar una metodología clara y directamente aplicable al caso de un sistema de transmisión en corriente continua.

En la primera parte del trabajo se busca presentar los elementos teóricos básicos, con esto se espera dar al lector familiaridad con los conceptos que se tratan a lo largo del documento. De forma posterior, se investiga la metodología y el estado del arte de ésta a nivel internacional, entregando así un esquema funcional de diseño.

Se pone especial énfasis en los estudios de campo eléctrico y potencial por tratarse de factores críticos en la operación y seguridad. Para esto se realizan modelos simplificados del electrodo y del terreno de instalación, y se aplica el método de elementos finitos usando el software COMSOL Multiphysics.

El análisis numérico a desarrollar incluye el desarrollo de un modelo en 2D simétrico con respecto al eje vertical y un modelo 3D, se presentan las características de ambos y el contraste de los resultados obtenidos para un problema expuesto en la bibliografía con el fin de validar el método.

Luego de esto se realiza un análisis de sensibilidad para el modelo, con el fin de observar las tendencias que tienen las simulaciones y constatar que sigan las tendencias observadas en la bibliografía y los métodos analíticos.

El estudio se completa con un capítulo de aplicación de la metodología a casos prácticos de distintas características presentados en la bibliografía.

Se concluye que el método de elementos finitos es una herramienta totalmente válida y apta para la simulación del problema de distribución de potencial y gradiente. El método tiene la capacidad de manejar dominios complejos a coste de tiempo de computación y uso de memoria. Además, el uso de un software comercial hace simple la manipulación de datos y la gestión de información para su post-procesamiento.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi comisión. El profesor Nelson Morales quien siempre presentó la mejor disposición y aportó su dirección al tema planteado, a Gabriel Olguín quien me presentó el tema, dio su apoyo, me mantuvo atento y colaboró significativamente en su desarrollo, y Leopoldo Vallejos cuya experiencia y cercanía al tema lo convirtieron en un apoyo invaluable en el último tramo del trabajo.

Quisiera también agradecer y dedicar este trabajo a mi familia, a mis padres por su amor, comprensión, apoyo permanente, incondicional (y financiero) de esta etapa de mi vida.

Extendiendo este agradecimiento, me gustaría incluir a mis compañeros a lo largo de la carrera, amigos de la vida y todos aquellos que hicieron mi estadía en la Universidad más llevadera en todo momento y, más aún, una buena etapa en general.

Índice de Contenidos

1. Introducción 1

1.1. Motivación 1

1.2. Objetivos 1

1.3. Hipótesis de trabajo 2

1.4. Estructura de la memoria 2

2. Antecedentes Bibliográficos 3

2.1. Sistemas de transmisión HVDC 3

2.1.1. General 3

2.1.2. Comparación HVDC-HVAC 4

2.1.3. Configuraciones de enlace 6

2.1.4. Componentes de una terminal HVDC 9

2.2. Electrodo 11

2.2.1. General 11

2.2.2. Tipos de electrodos 12

2.2.3. Parámetros básicos de electrodos 14

2.2.4. Aspectos básicos de transmisión terrestre 16

2.3. Método de elementos finitos 19

2.3.1. Introducción al método de elementos finitos 20

2.3.2. Formulación del problema mediante elementos finitos 20

2.3.3. Método de elementos finitos aplicado al cálculo de campos electrostáticos 23

3. Estado del Arte para el Diseño de Electrodos en Sistemas HVDC 26

3.1. Selección de sitio 27

3.1.1. Selección preliminar de sitios 27

3.1.2. Fase de estudios 30

3.1.3. Selección definitiva de sitio 37

3.2. Definición del diseño 38

3.2.1. Corrientes del sistema 39

3.2.2. Tiempo de operación 39

3.2.3. Confiabilidad 41

3.2.4. Seguridad *42*
3.2.5. Vida útil *44*
3.2.6. Temperatura *44*
3.2.7. Materiales de electrodos *45*
3.2.8. Configuración de electrodos *47*
3.2.9. Establecer un diseño definitivo *50*
3.3. Consideraciones especiales 51
3.3.1. Interferencia con sistemas eléctricos *52*
3.3.2. Corrosión electrolítica *53*
3.3.3. Efectos de campos magnéticos *55*
3.3.4. Productos de la electrolisis *55*
3.4. Testeo y monitoreo 56
3.4.1. Pruebas *56*
3.4.2. Pruebas de comisionamiento *58*
4. Modelación del Problema de Distribución de Potencial y Campo Eléctrico para Análisis de Elementos Finitos 60
4.1. Modelamiento 60
4.1.1. Modelado axi-simétrico *62*
4.1.2. Modelado tridimensional *65*
4.2. Validación del modelo 67
4.2.1. Validación del área de influencia *72*
4.3. Discusión de resultados 74
4.3.1. Comparación de los modelos propuestos *75*
4.3.2. Influencia de capas profundas en el modelo *76*
5. Sensibilidad de Parámetros del Modelo 78
5.1. Radio del terreno 79
5.2. Profundidad del terreno 79
5.3. Efectos de la profundidad de enterramiento del electrodo 80
5.4. Efectos de la variación de corriente inyectada 81
5.5. Efectos de la variación de resistividad 83
5.6. Variación en el radio del anillo 86
5.7. Variación en la capa de coque 88

6. Casos Prácticos de Aplicación 90
6.1. Ejemplos de electrodo anillo 90
6.2. Itaipú 93
6.2.1. San Roque 93
6.2.2. Foz de Iguazú 97
6.3. Análisis de electrodo influenciado por el mar 99
6.4. Electrodo lineal de costa 102
7. Conclusiones 105
7.1. Recomendaciones 105
7.2. Trabajos futuros 106
8. Referencias 108

Índice de Figuras

Figura 2.1: Comparación entre torres y franjas de servidumbre para potencias equivalentes en AC y DC. 6
Figura 2.2: Enlace monopolar a) retorno por metálico, b) retorno por tierra. 6
Figura 2.3: Configuración bipolar con electrodos de retorno. 7
Figura 2.4: Configuración homopolar. 8
Figura 2.5: Configuración back-to-back. 8
Figura 2.6: Configuración multiterminal. 9
Figura 2.7: Subestación convertidora HVDC. 9
Figura 2.8: Efectos de la humedad sobre la resistividad. Datos: [16]. 18
Figura 2.9: Efectos de la salinidad sobre la resistividad. Datos: [16]. 18
Figura 2.10: Efectos de la temperatura sobre la resistividad. Datos: [16]. 19
Figura 2.11: Planteamiento genérico de una metodología usando MEF. 20
Figura 2.12: Detalle, planteamiento de problemas usando MEF. 21
Figura 3.1: Caracterización del sistema en estudio. 26
Figura 3.2: Ejemplo en base a una línea de transmisión tipo. Mapa: Google Maps. 28
Figura 3.3: Esquema de medición con 4 electrodos. 32
Figura 3.4: Esquema de funcionamiento del método TEM para mediciones de resistividad. 34
Figura 3.5: Esquema básico para medición magnetotelúrica. 35
Figura 3.6: Esquema en funcionamiento normal (izquierda), esquema con retorno metálico por línea (derecha). 40
Figura 3.7: Esquema seccionado de conductores. 42
Figura 3.8: Definición de corriente de paso (izquierda) y toque (derecha). Corriente circulante en rojo. 43
Figura 3.9: Formas usuales de electrodos a) Línea b) Varias líneas c) Anillo d) Doble anillo e) Estrella f) Estrella ramificada. 48
Figura 3.10: Corte transversal a electrodo terrestre superficial típico. 48
Figura 3.11: Corte transversal a electrodo de pozo. Basado en Apollo (Cahora Bassa) según datos de [29]. 49
Figura 3.12: Ejemplo de composición de electrodo anódico marino. 50
Figura 3.13: Criterio de dimensionamiento para el electrodo. Fuente: [31]. 51
Figura 3.14: Corrosión de estructuras metálicas ante electrodos. 53
Figura 3.15: Ejemplo de mediciones para tensión de paso y toque. Corte transversal del terreno. 57
Figura 3.16: Curvas equipotenciales de un problema genérico. 58
Figura 4.1: Modelos de suelo a) Paralelepípedo b) Cilíndrico. 60
Figura 4.2: Planteamiento del problema mediante volúmenes diferenciados empleando una transformada. 62

Figura 4.3: Planteamiento del problema mediante el equivalente circuital de un volumen en una superficie. 62
Figura 4.4: Geometría del problema axi-simétrico de dos capas. 63
Figura 4.5: Condiciones de borde para el problema axi-simétrico. 64
Figura 4.6: Ejemplo de esquema de líneas de flujo. 64
Figura 4.7: Ejemplo de operación diferencia entre objetos. 66
Figura 4.8: Geometría del problema tridimensional. 66
Figura 4.9: Condiciones de borde de terreno para modelo 3D. 67
Figura 4.10: Modelos de terreno para validación. 68
Figura 4.11: Curvas equipotenciales para el electrodo tipo anillo para estudio de área de influencia. 73
Figura 4.12: Gráfico potencial vs. Distancia radial para el electrodo tipo anillo y una carga esférica de tamaño reducido. 73
Figura 4.13: Líneas de campo eléctrico en el terreno. 75
Figura 4.14: Detalle de potencial sobre el electrodo en modelo tridimensional. 76
Figura 4.15: Comparación de la distribución de potencial 0-100[km], modelos de 1 a 4 capas. 77
Figura 5.1: Esquema caso base. 78
Figura 5.2: Distribución de potencial de superficie local en función de la profundidad de enterramiento del electrodo tipo anillo. 81
Figura 5.3: Distribución de potencial de superficie local en función de la corriente inyectada en el electrodo. 82
Figura 5.4: Distribución de líneas de densidad de corriente. Terreno $\boldsymbol{\rho 1 < \rho 2}$ 83
Figura 5.5: Distribución de líneas de densidad de corriente. Terreno $\boldsymbol{\rho 1 > \rho 2}$ 83
Figura 5.6: Distribución de potencial de superficie local en función de la resistividad de la capa inferior de terreno. 85
Figura 5.7: Distribución de potencial de superficie local en función de la resistividad de la capa superior de terreno. 86
Figura 5.8: Distribución de potencial de superficie local en función del cambio en el radio del electrodo tipo anillo. 87
Figura 5.9: Distribución de potencial de superficie local en función del cambio de la sección del electrodo tipo anillo. 89
Figura 6.1: Modelo genérico de electrodo anillo en terreno de dos capas. 90
Figura 6.2: Corte transversal. Distribución de potencial. 92
Figura 6.3: Distribución de potencial superficial en dirección radial. 92
Figura 6.4: Modelo de terreno para electrodo Iguazú-San Roque. 93
Figura 6.5: Modelamiento de electrodo Itaipú - San Roque. 94
Figura 6.6: Curvas equipotenciales para el modelo de suelo de San Roque. 95
Figura 6.7: Curva semilogarítmica de distribución de potencial superficial. Dirección roca sedimentaria. 96

Figura 6.8: Curva semilogarítmica de distribución de potencial superficial. Dirección roca cristalina.....96
Figura 6.9: Modelado de terreno de 4 estratos Itaipú – Foz de Iguazú.....97
Figura 6.10: Curvas equipotenciales, electrodo Itaipú - Foz de Iguazú. 98
Figura 6.11: Distribución de potencial en dirección radial, electrodo Itaipú – Foz de Iguazú.....98
Figura 6.12: Modelos de suelo presentados en [21].....99
Figura 6.13: Líneas equipotenciales para un terreno bajo influencia marina a 50[km].100
Figura 6.14: Modificación de modelo San Roque. Suelo sedimentario/ Mar.....102
Figura 6.15: Electrodo lineal de costa. 103
Figura 6.16: Líneas equipotenciales para un electrodo lineal de costa.....104
Figura 6.17: Distribución de potencial, volumen. Electrodo lineal de costa. 104

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Principales ventajas y desventajas de los electrodos terrestres. 12
Tabla 2.2: Principales ventajas y desventajas del electrodo marino. 13
Tabla 2.3: Principales ventajas y desventajas de los electrodos de costa. 13
Tabla 3.1: Aspectos de diseño para electrodos. 29
Tabla 3.2: Tabla de calificación para alternativas de locación de electrodo de puesta a tierra. 38
Tabla 3.3: Cálculo de operación anódica total del sistema. 41
Tabla 3.4: Corrientes tolerables, voltajes de paso y gradiente cerca de un electrodo de puesta a tierra DC. 44
Tabla 3.5: Regulación según nivel de GPR. 52
Tabla 4.1: Resultados obtenidos en [26] y [32] 69
Tabla 4.2: Resultados obtenidos para el caso tridimensional. 70
Tabla 4.3: Resultados obtenidos para el caso axi-simétrico (terreno 10[km] radio, 1[km] de profundidad). 71
Tabla 4.4: Resultados obtenidos para el caso axi-simétrico (terreno: radio 100[km] profundidad 20[km]). 72
Tabla 5.1: Efectos de la variación del radio del terreno. 79
Tabla 5.2: Efectos de la variación de la profundidad del terreno. 80
Tabla 5.3: Efectos de la variación de la profundidad del electrodo. 80
Tabla 5.4: Efectos de la variación de la corriente inyectada al electrodo. 82
Tabla 5.5: Efectos de la variación de la resistividad en la capa inferior de terreno. 84
Tabla 5.6: Efectos de la variación de la resistividad en la capa superior de terreno. 85
Tabla 5.7: Efectos de la variación del radio del electrodo anillo. 87
Tabla 5.8: Efectos de la variación del espesor de la capa de coque. 88
Tabla 6.1: Comparación de resultados para diseños de electrodo tipo anillo. 91
Tabla 6.2: Resultados de estudio local, electrodo Itaipú – Foz de Iguazú. 97
Tabla 6.3 : Potencial superficial para los modelos presentados en [21]. 101
Tabla 6.4: Estudio de valores locales, electrodo lineal de costa. 103

1. Introducción

1.1. Motivación

Ante el eventual arribo de la tecnología HVDC (*High Voltage Direct Current*) al país por proyectos de interconexión tales como Hidroaysén, Energía Austral, la interconexión SIC-SING o el proyecto de la gran carretera eléctrica; se hace necesario realizar todos los estudios necesarios para garantizar el mejor funcionamiento posible de esta tecnología.

Esta tecnología introduce nuevos conceptos en transmisión eléctrica, así como también diferencias en algunos elementos cuyo uso difiere en relación a la transmisión tradicional en corriente alterna. Un ejemplo de esto es que la puesta a tierra mediante el uso de electrodos, usualmente empleada como vía de escape para corrientes de falla en sistemas AC tradicionales, tiene como finalidad adicional el emplear la tierra (y en ocasiones, el agua) como una vía para la transmisión de corriente.

En este trabajo también se introduce el análisis de elementos finitos como herramienta numérica para la solución del problema de la distribución de campo eléctrico y el potencial. El método de los elementos finitos es ampliamente utilizado en diferentes áreas de la ingeniería, más aún en la industria especializada ya es empleado para el estudio y el diseño de electrodos. Por esto, resulta importante establecer una metodología para el diseño y estimular el uso de métodos numéricos prácticos que pueden entregar mejores resultados que metodologías analíticas establecidas, dado el estado del arte del cálculo computacional.

1.2. Objetivos

Esta memoria presenta un objetivo general, consistente en la realización de un procedimiento para el diseño conceptual de electrodos de puesta a tierra para una línea de corriente continua, estudiando el comportamiento e interacción de estos con el ambiente.

En el presente trabajo se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- Describir el tema de diseño de electrodo para el caso de corriente continua y sus fundamentos teóricos.
- Efectuar un análisis a través de simulaciones mediante el método de elementos finitos implementado en software.
- Comprobar la validez del método y analizar los resultados en función de la bibliografía existente.

A través del cumplimiento de estos objetivos se espera realizar un trabajo autocontenido, que cumpla con la entrega de un procedimiento para el diseño a nivel conceptual y resultados comparables a estudios previos realizados en base a la experiencia internacional y otras metodologías existentes.

1.3. Hipótesis de trabajo

La implementación de un modelo mediante software facilita el análisis para el diseño conceptual de los electrodos, y el método de elementos finitos logra capturar de mejor manera la fenomenología asociada al nivel de potencial eléctrico en el electrodo y el medio que le rodea, que otras metodologías analíticas existentes que poseen limitaciones en su funcionamiento.

1.4. Estructura de la memoria

El presente documento consiste de siete capítulos incluyendo esta introducción. La organización de los siguientes capítulos se muestran a continuación:

En el capítulo 2 están contenidos los aspectos básicos de los temas a tratar en el trabajo, tiene por objetivo conceptualizar al lector para el entendimiento del desarrollo subsecuente.

En el capítulo 3 se presenta la estructura típica de la etapa de diseño para un proyecto de electrodo de puesta a tierra para un sistema de transmisión HVDC. Se busca clarificar la metodología y establecer lineamientos generales para el diseño.

En el capítulo 4 se muestra el modelamiento para el problema de la distribución de potencial en terreno. En este capítulo se realiza también la validación del método realizando contrastes entre algunos modelos desarrollados y referencias bibliográficas.

En el capítulo 5 se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros para el problema revisado en el capítulo 4. Se verá la influencia de los distintos factores en los resultados entregados por el modelo.

En el capítulo 6 se presentan variados casos de estudio en que deben ser empleados distintos métodos de modelamiento. En este capítulo se amplía la validación de la metodología propuesta a casos de distintas características presentados en la literatura, también se tiene la capacidad de contrastar los resultados obtenidos con resultados medidos luego de la puesta en marcha de electrodos.

Finalmente, el capítulo 7 da a conocer las conclusiones obtenidas y los trabajos a futuro identificados de acuerdo al desarrollo.

2. Antecedentes Bibliográficos

En este capítulo se busca abordar de forma introductoria los tópicos necesarios para comprender los conceptos básicos de este trabajo. Los temas generales a considerar son: sistemas de transmisión HVDC, electrodos de puesta a tierra y método de elementos finitos.

2.1. Sistemas de transmisión HVDC

La transmisión de energía eléctrica en corriente continua es una tecnología ampliamente difundida y consolidada a nivel global, más aún se encuentra en continua evolución por la mejoría creciente en las tecnologías y métodos de estudio que hacen parte de la construcción de estos sistemas.

En Chile no se ha requerido de la implementación de esta tecnología por no existir las condiciones en los niveles de tensión, potencia y distancia que hacen de esta opción la mejor alternativa. Sin embargo, en la actualidad existen diversos proyectos que podrían requerir esta tecnología para su factibilidad, con lo que se pueden augurar buenas posibilidades para la aplicación de esta tecnología en el país.

2.1.1. General

En los albores del desarrollo de sistemas eléctricos a gran escala, a fines del siglo XIX, se hace patente la necesidad de transmitir energía eléctrica para modernizar los sistemas de iluminación existentes. Los avances de entonces, estaban enfocados en acumuladores y generadores eléctricos en corriente continua, por lo que la distribución originalmente se planteó con este tipo de tecnología.

Los avances en cuanto al uso del campo magnético rotatorio dieron paso al mejoramiento de la máquina de inducción, que junto al desarrollo del transformador sirvieron para potenciar la corriente alterna como la opción para la transmisión eléctrica. Estos avances permitieron reducir los costos de generación, reducir pérdidas por efecto Joule mediante la elevación de tensión, luego el uso masivo de máquinas de inducción en la industria y la transmisión trifásica terminaron de inclinar la balanza a favor de la corriente alterna.

Pese a esto, los estudios de corriente continua mantuvieron su desarrollo de forma paralela al de la corriente alterna, aunque líneas de este tipo no fueron realizadas hasta mediados del siglo XX, cuando se conectó la isla de Gotland con Suecia continental mediante un enlace de 20[MW] basado en válvulas de mercurio. El desarrollo de la electrónica de potencia a lo largo de la segunda mitad del siglo XX hizo posible la

evolución de este tipo de interconexión logrando niveles de transferencia de carga de miles de MW a grandes distancias. [[12],[18],[28]]

2.1.2. Comparación HVDC-HVAC

En esta sección se compararán las características técnicas, económicas y ambientales del uso de una u otra tecnología. [18]

2.1.2.1. Características técnicas

Las principales diferencias entre un sistema HVDC con uno HVAC a nivel técnico son:

- Los sistemas de corriente alterna presentan restricciones en la transmisión debido a los parámetros capacitivos e inductivos de las líneas, los cuales resultan limitantes en alcance y capacidad. Esto tiene consecuencias en interconexiones extensas o cables con alta corriente capacitiva de excitación (tales como aquellos especiales para enlaces subterráneos o submarinos).
- Para el caso de una interconexión de sistemas con distinta frecuencia, la única alternativa es la interconexión en corriente continua, por tratarse de un enlace asíncrono. Además, en este tipo de unión la transferencia de potencia no oscila con las fluctuaciones de cada subsistema.
- Las tecnologías HVDC proporcionan la capacidad de controlar de forma rápida y segura la potencia activa que entrega a un sistema, inclusive pudiendo controlar la potencia reactiva según la tecnología empleada.
- El campo en continua es unidireccional, por lo que es posible reducir los niveles de aislación en los cables.
- Las sobretensiones de maniobra para corriente continua son menores, del orden de 1.5 a 2 veces la tensión nominal, mientras que en alterna estas oscilan entre 2 y 3 veces la nominal.
- Los enlaces HVDC, producto de la rectificación generan contaminación armónica en los lados de alterna del sistema.
- Las subestaciones convertidoras que operan con tecnología HVDC clásica presentan un alto consumo de reactivos.

2.1.2.2. Características económicas

Este es el aspecto crítico, que ha dejado a la tecnología HVDC postergada en cuanto a participación, los principales elementos a considerar se enuncian a continuación:

- Los sistemas HVDC pueden operar en un punto óptimo económico, al contrario que en sistemas HVAC donde se deben elevar tensiones con el fin de mantener estabilidad en las líneas aéreas, y el sistema queda operando fuera de su óptimo.
- Debido a los parámetros capacitivos e inductivos que presentan los enlaces en alterna, es necesario invertir en equipo para atenuar estos efectos. La inversión en este tipo de equipos, sumado a las pérdidas de línea, aumentan el valor del

proyecto haciendo que los enlaces en corriente continua se conviertan en una alternativa competitiva.

- Las torres de alta tensión necesarias para una línea de corriente continua son de menor tamaño que para una línea de corriente alterna de igual potencia, lo que redunda en costos de construcción menores. Además, se requieren menos conductores (un único conductor en caso monopolar y dos en caso bipolar en lugar de tres del caso trifásico), y no se requiere de transposiciones por lo que no es necesario el empleo de estas torres.
- Las subestaciones convertidoras de HVDC se basan en dispositivos semiconductores controlados de alta capacidad cuyos costos son, por lo general, muy mayores a los de las subestaciones tradicionales.
- Debido al elevado consumo de reactivos de las subestaciones rectificadoras, es necesario suministrar localmente la potencia reactiva necesaria, lo que implica invertir en equipos adicionales.
- Un enlace HVDC requiere invertir en filtros para la contaminación armónica que introducen del lado de alterna del sistema.
- En una interconexión HVDC, no es posible cambiar el nivel de tensión con facilidad, por lo tanto, usualmente estos esquemas incluyen equipos AC adicionales en los que se debe invertir.

2.1.2.3. Características ambientales

Por el otro lado, las características ambientales favorecen a la tecnología HVDC:

- La franja de servidumbre necesaria para interconexiones HVDC puede ser significativamente menor para un mismo nivel de potencia. Además las torres, al tener menos conductores, tienen menos requerimientos mecánicos por lo que pueden ser más simples, minimizando el impacto visual.
- El campo magnético de la corriente continua es estático y de baja magnitud, similar al campo magnético terrestre, por lo que se puede inferir que no presenta efectos perceptibles.
- El efecto corona asociado a corriente continua, y la generación de ozono generada por dicho efecto no supera el orden de magnitud de procesos naturales.
- Para sistemas HVDC que hagan uso del retorno por tierra, se pueden generar diferencias de tensión en el terreno circundante a los electrodos, induciendo corrientes en otras instalaciones existentes y/o produciendo efectos tales como oxidación y corrosión de estos.

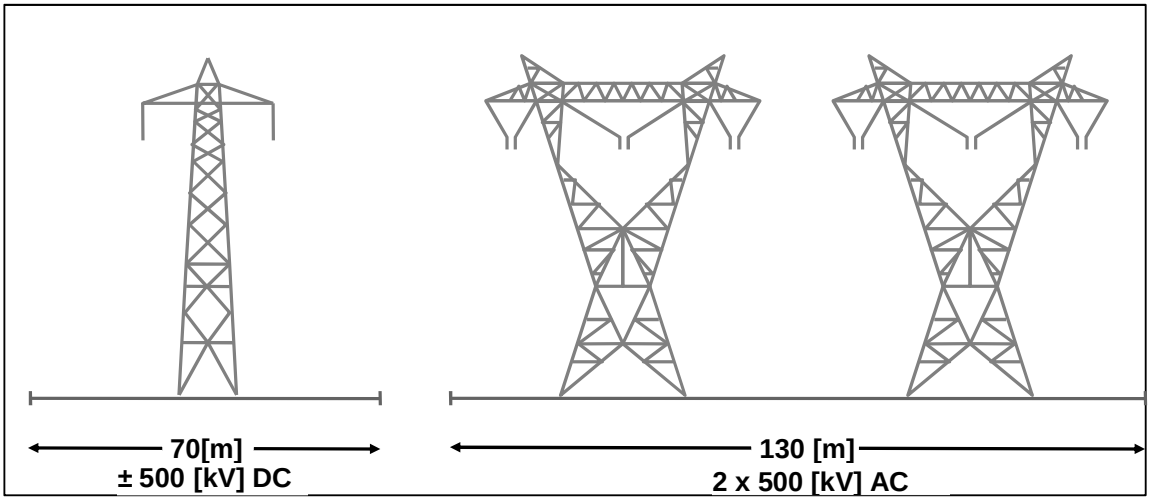

Figura 2.1: Comparación entre torres y franjas de servidumbre para potencias equivalentes en AC y DC.

2.1.3. Configuraciones de enlace

Los distintos enlaces de interconexión entre subestaciones convertidoras dan lugar a varias clasificaciones [[18], [28]]:

2.1.3.1. Enlace monopolar

Esta configuración se caracteriza por el empleo de un único conductor para la transmisión de corriente entre subestaciones convertidoras, el retorno de la corriente para esta configuración puede ser por tierra, o mediante el uso de otro conductor que se denomina retorno metálico. Este conductor se polariza, usualmente, de forma negativa para reducir el efecto corona y posibles radiointerferencias.

Un esquema simplificado se presenta en la Figura 2.2:

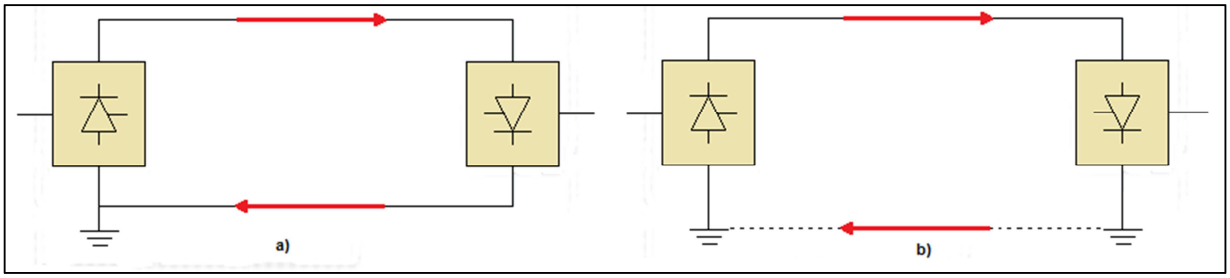

Figura 2.2: Enlace monopolar a) retorno por metálico, b) retorno por tierra.

Esta configuración es la más económica por el ahorro de un conductor en relación a las que se verán en los siguientes puntos, mas es la que presenta menos confiabilidad pues ante cualquier falla la instalación queda fuera de servicio.

Dos elementos a considerar para la selección del tipo de retorno son: restricciones medioambientales y niveles de pérdida. Debido a su menor costo la opción de retorno

por tierra es usualmente la preferida, sin embargo, en caso de existir problemas con cualquiera de estos dos factores se escogerá el retorno metálico.

2.1.3.2. Enlace bipolar

La conexión bipolar une las subestaciones convertidoras mediante dos conductores de distinta polaridad. La ventaja de este enlace es la posibilidad de operar con una línea fuera de servicio, transformándose momentáneamente en un enlace monopolar con la activación del retorno. Además, el nivel de armónicos aportado por una configuración bipolar es mucho menor que una monopolar para cargas cercanas a las subestaciones.

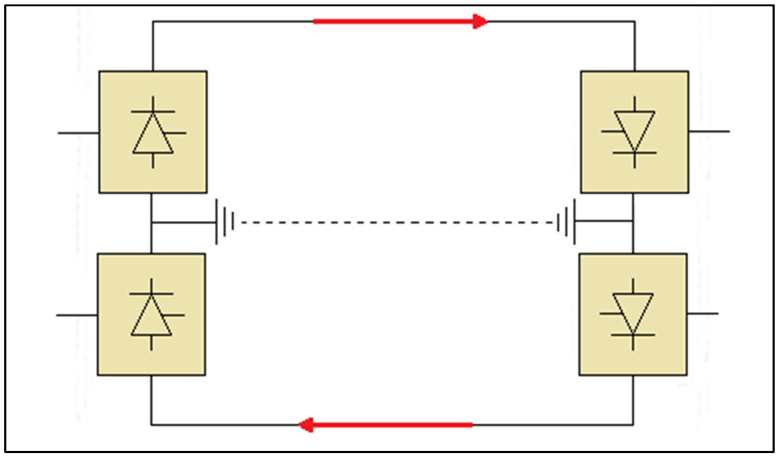

Figura 2.3: Configuración bipolar con electrodos de retorno.

2.1.3.3. Enlace homopolar

Esta conexión emplea dos conductores con la misma polaridad, y al igual que el enlace monopolar, utiliza de forma permanente el retorno por tierra o metálico. Por ende, esta configuración se puede ver como la superposición de dos enlaces monopolares, con la diferencia que ésta posee un mayor grado de seguridad al contar con dos líneas.

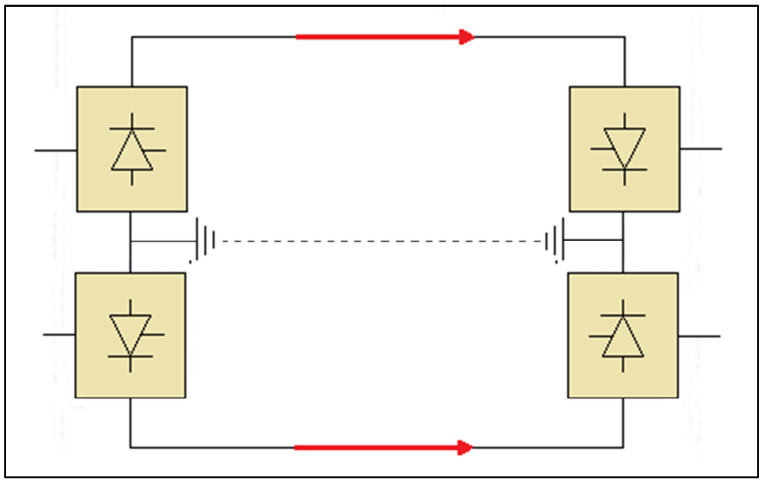

Figura 2.4: Configuración homopolar.

2.1.3.4. Back-to-back

Esta configuración se caracteriza porque las subestaciones convertidoras se encuentran en el mismo lugar físico, sin línea de transmisión considerable. En general, este sistema se usa para bajos niveles de tensión y altas corrientes en los tiristores en casos de redes cercanas que no pueden ser sincronizadas por diferencias en sus frecuencias o en sus dinámicas.

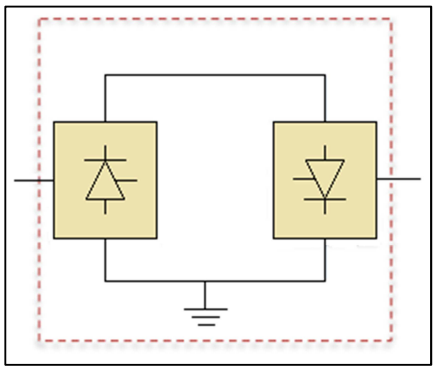

Figura 2.5: Configuración back-to-back.

2.1.3.5. Enlaces multiterminales

Simplemente se refiere a la interconexión de más de dos subestaciones en un sistema HVDC. Las interconexiones pueden realizarse en paralelo para subestaciones de gran capacidad, serie para subestaciones de menor capacidad (10% o menos del total inyectado mediante la línea [12]) o una mixtura de estos. Por la dificultad en el control y protecciones, además de los costos de estos sistemas se recomienda mantener un número reducido de subestaciones.

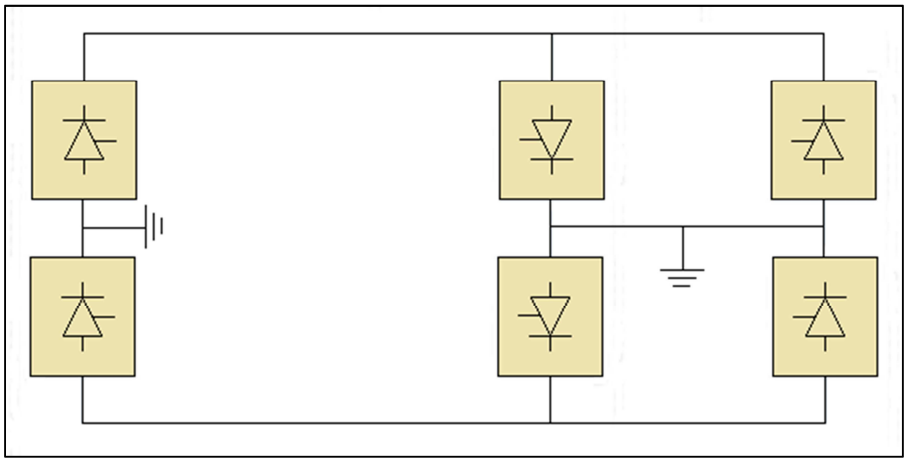

Figura 2.6: Configuración multiterminal.

2.1.4. Componentes de una terminal HVDC

En la Figura 2.7, se presentan los elementos de una estación convertidora HVDC para el caso de una configuración bipolar como la presentada en el esquema simplificado de la Figura 2.3.

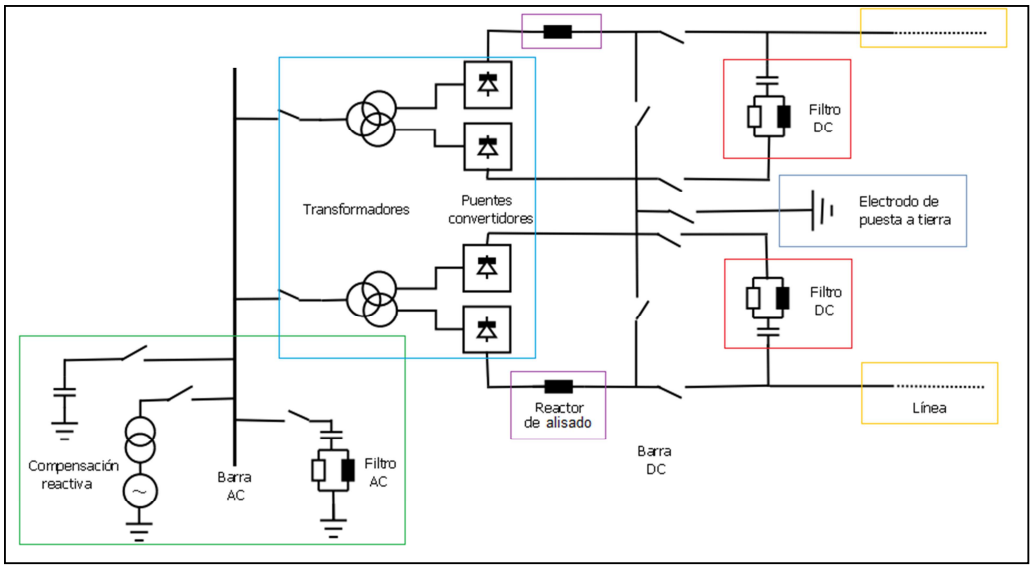

Figura 2.7: Subestación convertidora HVDC.

Los elementos, descritos de izquierda a derecha de acuerdo a lo descrito en [12] son:

2.1.4.1. Filtros AC y compensación reactiva

En el lado AC deben filtrarse componentes armónicas correspondientes a interferencia en los sistemas o, en el caso de la rectificación, la introducción de estas

componentes en el proceso. Para este fin se emplean filtros compuestos de reactores y condensadores.

Además, para su operación, la sección convertidora del sistema tiene un alto requerimiento de reactivos durante su operación. Por este motivo, se emplean fuentes de poder cercanas a los convertidores, esta compensación se realiza con bancos de condensadores, condensadores síncronos u otros dispositivos FACTS.

2.1.4.2. Estación convertidora

Esta sección tiene como fin el paso de la corriente de AC a DC en la sección rectificadora y viceversa en la inversora. Para lograrlo se emplean transformadores con cambiador de tap, cuyo fin es: llevar la transmisión al nivel de tensión requerido, separar eléctricamente la red de los conversores, reducir ruido armónico y limitar pérdidas. Esta etapa contempla también los convertidores, consistentes en puentes de dispositivos semiconductores que realizan la conversión (por ejemplo: tiristores, IGBT, IGCT).

A considerar, la puesta a tierra para la estación debe realizarse del lado DC pues este debe tener su propia referencia de tierra, por lo tanto, el transformador del lado del convertidor no debe aterrizarse.

2.1.4.3. Filtros (reactores) de alisado

Inductancias de gran tamaño se conectan en serie del lado DC. Estos filtros tienen varios fines:

- Reducir el contenido armónico en los voltajes y corrientes de las líneas.
- Previene discontinuidades en la corriente en casos de bajo nivel de carga.
- Reduce los efectos de perturbaciones en el sistema, por ejemplo, fallas de conmutación.

Para el uso de estos existe un compromiso entre la capacidad de filtrado que necesita de un gran reactor y la velocidad de respuesta del reactor que se ve favorecida con dispositivos de menor tamaño.

2.1.4.4. Filtros DC

Los filtros del lado de continua tienen por objetivo mitigar las oscilaciones del lado DC del sistema, con esto se previene la circulación de armónicas transientes por la línea y se evitan algunos problemas de conmutación.

2.1.4.5. Electrodo de puesta a tierra

La puesta a tierra es parte importante de estos sistemas, en las configuraciones monopolar y homopolar actúan empleando la tierra como circuito de retorno de la corriente de forma permanente, en el caso bipolar se empleará en caso de falla de uno

de los polos y/o para el balance de las corrientes. Este elemento es el de mayor interés en éste trabajo y será abordado en mayor profundidad en la sección 2.2 de este.

2.1.4.6. Líneas

Son los cables y/o conductores que conducen corriente continua desde la estación rectificadora a la inversora, sus características según el proyecto pueden diferir según la capacidad de transferencia, aislación o resistencia mecánica que puedan requerirse.

2.2. Electrodo

Como se menciona anteriormente, algunas de las configuraciones para los enlaces en corriente continua requieren el uso de electrodos de puesta a tierra para el retorno de las corrientes por tierra.

En la presente sección se introduce el concepto de electrodo de puesta a tierra y algunas definiciones prácticas para facilitar la comprensión de la metodología de diseño y análisis a realizar en los capítulos posteriores.

2.2.1. General

Los electrodos de puesta a tierra son conductores metálicos de baja resistividad, que actúan como la conexión física al suelo en que están inmersos. Esto tiene por fin la transferencia de corrientes “a tierra” para su transmisión a puntos distantes.

En el caso de sistemas HVDC, los electrodos tienen como finalidad:

- Referenciar la instalación eléctrica a un potencial determinado con el fin de proteger a las personas, el medio y los equipos. Como toda instalación eléctrica se requiere de una definición de voltaje a tierra como base para la coordinación de aislaciones y protecciones. Sin embargo, es usual la práctica de instalar el electrodo alejado de la subestación HVDC y otras instalaciones por los efectos corrosivos y de interferencia eléctrica;
- Permitir una ruta alternativa para la circulación de la corriente ante fallas o en el caso de líneas bipolares u homopolares, mantenimiento de una de las líneas o variaciones de corriente entre los circuitos. Esta ruta es el medio que se encuentra entre las dos subestaciones convertidoras, sin embargo, hay que notar que este medio no es homogéneo ni único, por lo que el comportamiento de la transmisión de corriente a tierra dependerá de los parámetros del suelo en cada punto y la configuración del electrodo existente.

Es necesario hacer notar que ante la ocurrencia de una falla que gatille la caída de una línea o el mantenimiento de una de ellas, el electrodo funcionará de acuerdo a la configuración del sistema: en caso de línea bipolar, el electrodo debe funcionar al máximo de su capacidad; en el caso homopolar ve reducido su funcionamiento; y en la

configuración monopolar el electrodo no requiere funcionar como retorno pues la caída implica el fin de la transmisión.

2.2.2. Tipos de electrodos

Los electrodos se caracterizan principalmente por su sitio de instalación [[6],[18], [30]], en la bibliografía se distinguen tres tipos: Electrodos terrestres, marinos y de orilla.

2.2.2.1. Terrestres

Tal como su nombre lo indica, estos electrodos se ubican en tierra, lejos de la influencia del agua. Se subdividen en superficiales, profundos y de pozos verticales, aunque estas dos últimas clasificaciones suelen agruparse en la categoría de profundos.

Los más comunes son los superficiales, estos usualmente abarcan un área de varias hectáreas y se entierran entre 1.2 y 8 [m] bajo la superficie. Los profundos se caracterizan por enterrarse a mayores profundidades, usualmente con el objetivo de alcanzar estratos de terreno de menor resistividad. Finalmente, los de orientación vertical son una opción válida cuando no se cuenta con suficiente espacio para la instalación de un electrodo horizontal típico y, al igual que el electrodo profundo, da la opción de alcanzar estratos con mejor conductividad, aunque su costo es muy superior debido a que los elementos se instalan en pozos individuales a profundidades que suelen superar los 100[m] por lo que requieren de un mayor grado de especialización.

Tabla 2.1: Principales ventajas y desventajas de los electrodos terrestres.

Ventajas	Desventajas
Potencial de evadir largas líneas de transmisión aéreas	Dificultad para encontrar sitios aptos
Fácil acceso para mantenimiento	Según las condiciones geológicas puede requerirse grandes extensiones de terreno
Reduce daños en las instalaciones aéreas por ambiente salino	Mayor probabilidad de provocar interferencias
	Mayor resistividad asociada al terreno
	Riesgo de sobrecalentamiento

2.2.2.2. Marinos

Estos electrodos se desarrollan en el fondo marino y en el interior del mar, a grandes distancias de la orilla. Las profundidades en el lugar en que se dispone el electrodo pueden variar entre 5[m] y 30[m]. Profundidades mayores a 30[m] dificultarían la instalación debido al tiempo de inmersión requerido para este fin.

Pese a que en general estos electrodos se ubican en agua salada, por lo que deben ser considerados materiales propicios para la construcción en este ambiente, los electrodos pueden ubicarse también en agua dulce.

Tabla 2.2: Principales ventajas y desventajas del electrodo marino.

Ventajas	Desventajas
Baja resistividad de terreno	Alto costo de inversión
Impacto visual mínimo	Altos costos de reparación e inspección
Se elimina el riesgo de sobrecalentamiento	Impacto potencial en el medioambiente
Bajo nivel de interferencia sobre otras instalaciones	Susceptibilidad a hielo y actividades humanas (p.ej.: navegación, pesca de profundidad)

2.2.2.3. De costa

Son electrodos que se desarrollan en la costa marina, por lo que están cercanos a la playa y por lo tanto al agua.

Se subdividen en electrodos de playa y de estanque: los primeros, se encuentran ubicados entre 10 y 50[m] dentro de la línea del agua ya sea enterrado en la playa o en pozos superficiales; y los de estanque, se encuentran ubicados en piletas llenas de agua, pero separados por rompeolas para atenuar efectos de marea. Esta última es la opción predilecta por la facilidad de acceso y regularidad en las condiciones del estanque.

Al tratarse de un sitio en un ambiente hibrido en relación a los tipos antes mencionados, este tipo de electrodo reúne las características de ambos tipos. Su posición facilita la instalación y el acceso, mientras que la interfaz electrodo-agua favorece una disipación eficiente del calor generado. Estas características se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2.3: Principales ventajas y desventajas de los electrodos de costa.

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de manutención	Costo de inversión
Baja probabilidad de interferencia sobre otras instalaciones	Dificultad de encontrar sitios con características apropiadas
Mínimo impacto en el ambiente	Impacto visual
Sin riesgo de sobrecalentamiento	Debe estar protegido del hielo, oleaje y efectos de la marea
Menor tamaño que un electrodo terrestre	

2.2.3. Parámetros básicos de electrodos

Los parámetros de diseño de un electrodo tienen relación con sus características deseables. La evaluación y dimensionamiento del electrodo se lleva a cabo en el capítulo 3, pero como introducción se definen algunos conceptos relacionados [[8],[35]].

2.2.3.1. Capacidad de transporte de corriente

Este término tiene relación con el tipo de operación, la corriente a transmitir mediante el enlace y el tiempo esperado de funcionamiento. Esto conlleva la necesidad de una superficie apta del electrodo y baja densidad de corriente (usualmente 1[A/m^2]). Con esto se busca mantener un buen funcionamiento sostenido y evitar que el suelo se seque por efectos de la electroósmosis.

Los diferentes tipos de operación, de acuerdo a la corriente circulante, en el electrodo son:

- **Corriente de carga continua**: para un sistema monopolar el electrodo debe tener la capacidad de operar de manera continua, es decir, conducir la corriente desde la línea a tierra y viceversa. Durante la operación en este modo, debe prevenirse el sobrecalentamiento y considerar sobrecargas específicas en el diseño. En este caso, la función del electrodo (ánodo o cátodo) si bien, no cambia la vida útil del sistema, su diseño y construcción si debe ser realizado para distintas solicitaciones.
- **Corriente de carga temporal**: los electrodos de puesta a tierra deben estar diseñados para soportar la corriente máxima del sistema en el caso de configuración bipolar. Usualmente, la operación monopolar tiene restricciones por regulación según el país por lo que el sistema debe estar diseñado para, al menos, mantenerse en operación monopolar durante el tiempo permitido por la regulación. En este caso, para fines de diseño ambos electrodos deben estar diseñados para la misma solicitación, pues su función será determinada por el polo que salga de servicio.
- **Sobrecorrientes temporales**: en caso de falla el operador del sistema puede requerir que la línea tolere una sobrecorriente temporal para atenuar la caída de tensión que las líneas HVDC, por usualmente transmitir grandes niveles de potencia, implican. Con esto se da tiempo para el ajuste del resto del sistema para mantener su correcta operación.
- **Sobrecorrientes transientes**: aquellas causadas por rayos u otros eventos, para el electrodo no significa esfuerzo, pero si debe ser considerada la conexión a neutro de equipos que pudiesen verse alterados por la corriente terrestre.

- **Corriente de desbalance**: es la corriente producto de diferencias entre la corriente circulante entre polos, suele estar entre el 1-3% de la corriente nominal de un sistema bipolar.

2.2.3.2. Máxima tensión permisible

La máxima tensión para el electrodo respecto a tierra remota está determinada por las propiedades eléctricas y térmicas del sitio en que se ubica. La expresión (2.1) es la que caracteriza este valor:

$$V_e = \sqrt{2\lambda\rho\Theta}[V] \tag{2.1}$$

Donde, λ es la conductividad térmica del terreno en [J/m^3℃], ρ la resistividad eléctrica del terreno en [Ωm] y Θ la elevación de la temperatura del electrodo [℃].

2.2.3.3. Resistencia del electrodo

La resistencia del electrodo debe ser tal que el aumento en la tensión respecto a tierra remota este limitado por el valor del máximo voltaje permisible. Luego, la expresión que caracteriza este parámetro está dada por la ecuación (2.2):

$$R_e = \frac{V_e}{I_d}[\Omega] \tag{2.2}$$

Donde, I_d es la corriente inyectada de diseño.

2.2.3.4. Gradiente de potencial

Es el factor crítico para la selección de sitio [6]. El gradiente de potencial tiene relación directa con los criterios de seguridad y con la compatibilidad con otros servicios. Estos criterios serán profundizados en el capítulo 3.

2.2.3.5. Constante de tiempo

Esta constante se define, para electrodos terrestres, como el tiempo requerido por el electrodo para alcanzar la temperatura de régimen permanente. Por definición, la expresión para la constante es:

$$T = \frac{\gamma}{2\lambda}\left(\frac{V_e}{\rho J}\right)^2 = \frac{\gamma}{2\lambda}\left(\frac{R_e A_e}{\rho}\right)^2 [s] \tag{2.3}$$

Donde, γ es la capacidad calórica del suelo en [J/m^3℃], λ la conductividad térmica del suelo en [W/m℃], ρ la resistividad eléctrica del terreno en [Ωm], V_e el máximo voltaje admisible en [V], J la densidad de corriente en [A/m^2], R_e la resistencia entre el electrodo y tierra remota [Ω],y A_e el área superficial del electrodo [m^2].

2.2.4. Aspectos básicos de transmisión terrestre

Considerando que el subsuelo será el medio empleado por los electrodos para la transmisión de corriente es relevante tener una idea básica del comportamiento de la corriente circulando por tierra, entendiendo tierra para este fin como el medio de circulación entre los electrodos ya sea tierra o agua.

Las corrientes telúricas, definidas como corrientes de cualquier naturaleza que circulan a través de tierra, pueden ser caracterizadas según su naturaleza: estacionarias, cuasi-estacionarias, de alta frecuencia y corrientes de impulso. Entre éstas, las relevantes para hacer distinción en este trabajo son las dos primeras categorías pues son aquellas en que se realiza la transmisión de energía eléctrica.

Un aspecto elemental es la resistencia entre electrodos. A diferencia de la corriente alterna, en que las inyecciones de corriente a tierra oscilan en función de la frecuencia, resistividad y permeabilidad magnética del terreno, limitando la extensión en su distribución; en el caso de corriente continua la distribución alcanza mayor extensión a lo alto y en profundidad con lo que se tiene la opción de usar secciones de menor impedancia. En consecuencia, para el caso de corriente alterna la transmisión depende de la extensión de la línea, mientras en el caso de corriente continua sólo es relevante la resistencia en los extremos [18].

Por lo tanto, la resistencia ofrecida por el sistema de electrodos consiste de la resistencia de puesta a tierra para ambos electrodos y la resistencia del terreno por el que circula la corriente, que para todos los fines prácticos se asume como la resistencia respecto a tierra remota. Respecto a la resistencia de los electrodos se profundiza en el capítulo 3 pues puede variarse mediante parámetros de diseño, pero para la resistencia del terreno en el sitio de instalación se deben tener ciertas consideraciones.

En particular, los principales factores que determinan la resistividad del terreno son [8]:

- Tipo de suelo.
- Humedad.
- Componentes salinos y elementos químicamente reactivos.
- Tamaño del grano y su distribución.
- Temperatura.
- Presión.

Estos factores influyen de diversas formas en la resistividad, a continuación se describe el efecto de cada uno.

Los elementos característicos más predominantes en los suelos son el silicio y el aluminio en forma de óxidos, seguidos de óxidos de fierro y magnesio y compuestos de calcio, sodio y potasio. Además, cuenta con pequeños porcentajes de sales solubles dependiendo de la humedad. El tipo de suelo queda determinado por el ordenamiento y la proporción de estos elementos dada por el transporte y acumulación de productos sólidos a lo largo del tiempo, si bien en su mayoría no son buenos conductores, existen componentes que facilitan el transporte de corriente por vía electrónica, electrolítica o conducción dieléctrica.

La humedad influye de forma apreciable sobre la resistividad propia del suelo. Su valor no es constante pues existen variaciones estacionales y dependencia de la constitución del subsuelo, profundidad y nivel freático. En el caso de instalación de electrodos debe considerarse los efectos de la corriente y la electroósmosis provocada por su operación.

Las sales disueltas favorecen la conductividad del terreno, su variación se relaciona con la humedad. Existen métodos para reducir la resistividad del terreno mediante componentes que actúan favoreciendo la conductividad ampliamente utilizados para mejorar la conductividad en la puesta a tierra tradicional que incluyen el uso de aditivos con características salinas.

El tamaño del grano y la compactación otorgan continuidad física, influyendo así en la transmisión.

La resistividad del terreno varía con la temperatura. Para temperaturas muy reducidas, se reduce la movilidad iónica y electrónica, para temperaturas muy elevadas puede existir electroósmosis y evaporación o incluso ebullición del agua a nivel del suelo, dificultando la conducción.

Finalmente, la presión tiene relación con varios factores antes mencionados, favorece reacciones químicas muchas veces indeseables como la gasificación de componentes y provoca aumentos significativos en la temperatura.

De acuerdo a la norma IEEE 80 – 2000 [16], entre los factores aquí mencionados aquellos cuya influencia es más apreciable son la presencia de sales, humedad y temperatura. Su relevancia queda de manifiesto en los gráficos que se presentan a continuación:

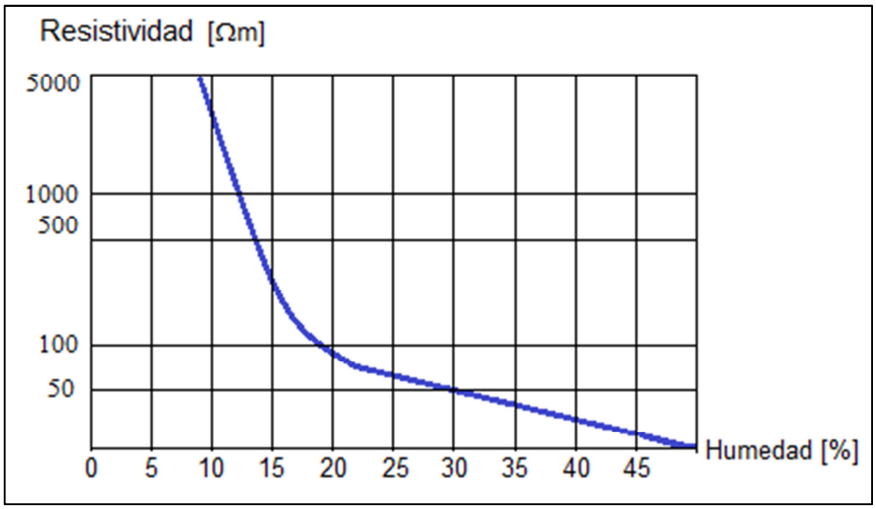

Figura 2.8: Efectos de la humedad sobre la resistividad. Datos: [16].

En la Figura 2.8 se aprecia en primer lugar que el porcentaje de humedad no empieza desde cero, inclusive en terrenos desérticos el subsuelo tiene un porcentaje de humedad no despreciable. En torno al 15-20% de humedad, es suficiente para combinarse con las sales presentes en el terreno mejorando significativamente la conducción electrolítica.

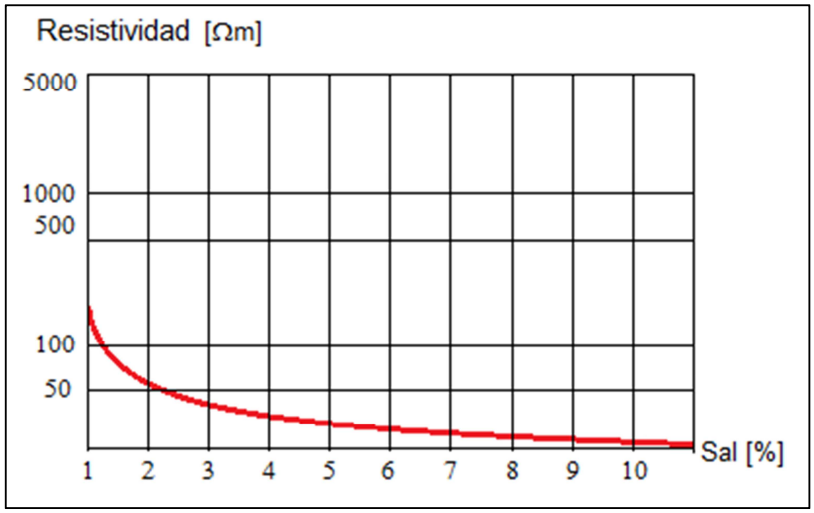

Figura 2.9: Efectos de la salinidad sobre la resistividad. Datos: [16].

En base al gráfico expuesto en la Figura 2.9 se puede apreciar que el porcentaje total de sales en terreno no es elevado en relación al total del terreno, lo que aplica para la mayoría de los casos, pero puede contribuir significativamente en la reducción del valor de la resistividad.

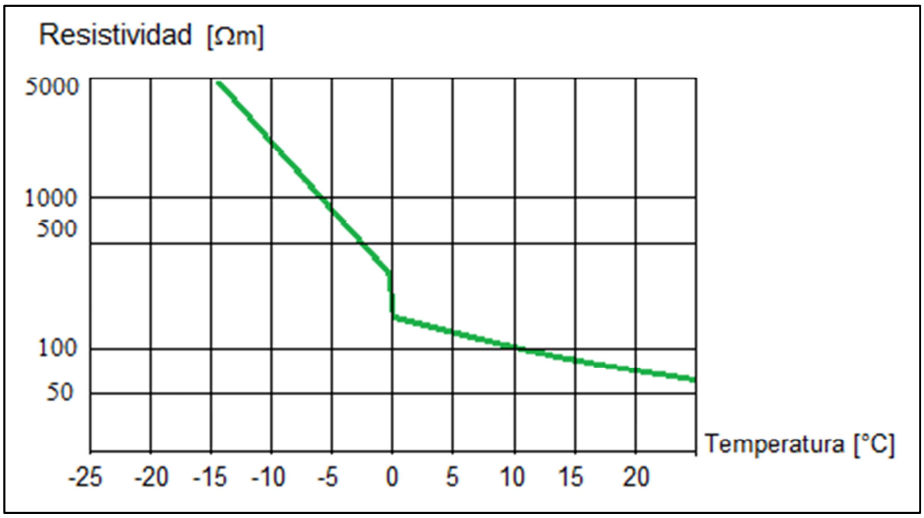

Figura 2.10: Efectos de la temperatura sobre la resistividad. Datos: [16].

En la Figura 2.10 se aprecia lo antes mencionado, en torno a los cero grados debido al punto de congelación del agua existe una pendiente muy empinada producto principalmente de la movilidad electrolítica. La variación presentada es para suelo arenoso con un 15.2% de humedad.

2.3. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF), es un método numérico que se aplica para la resolución de problemas definidos por ecuaciones diferenciales y condiciones de borde en física y matemáticas, con aplicación consecuente en ingeniería. Al tratarse de un método genérico puede ser aplicado para solucionar de forma aproximada cualquier sistema planteado mediante ecuaciones diferenciales, sin embargo, tiene aplicaciones destacadas en los campos de: análisis de deformaciones, esfuerzos, filtraciones y campos de flujo térmicos, de fluidos y electromagnéticos.

En la medida de que existen avances en la capacidad de cálculo de los computadores, así como mejoras importantes en los sistemas CAD y los algoritmos asociados al método, es posible realizar modelos para sistemas de alta complejidad con relativa facilidad. Esto da opciones crecientes a su uso en la industria en base a su versatilidad y a ser una herramienta bastante utilizada en ciertos campos de la ingeniería, lo que facilita la adaptación a su uso.

A diferencia de otros métodos numéricos tales como el método de las diferencias finitas, este método se caracteriza por ser aplicable en problemas lineales o no lineales, con geometrías irregulares, condiciones de frontera inusuales y/o de composición heterogénea. Esto le otorga al método una versatilidad tal que lo hace apto para prácticamente cualquier tipo de estudio.

2.3.1. Introducción al método de elementos finitos

El MEF consiste en la discretización de una región del continuo en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. El sistema es regido por las propiedades asociadas al material del modelo y las relaciones que rigen el sistema, consideradas mediante el uso de condiciones de borde.

La idea de esto es pasar de un problema continuo de la forma:

$$Y = Y(x, y, z) \tag{2.4}$$

Con condiciones específicas, que satisface una ecuación diferencial, a un problema discreto, donde se busca una solución de la forma:

$$\tilde{Y} = \sum C_i \, F_i(x, y, z) \tag{2.4}$$

Es decir, una solución aproximada basada en la separación del problema en un número finito de problemas más pequeños con una base finita de funciones F_i y constantes u otros elementos dependientes del problema C_i.

La resolución del problema, usualmente no es tan directa, sino que conlleva la resolución de los problemas reducidos y su posterior ensamble, generando dependencia entre ellos por sus condiciones de borde.

2.3.2. Formulación del problema mediante elementos finitos

La estructura genérica del planteamiento de una metodología de elementos finitos, cuya estructura general es aplicable en realidad a cualquier tipo de modelamiento, se muestra en la siguiente figura:

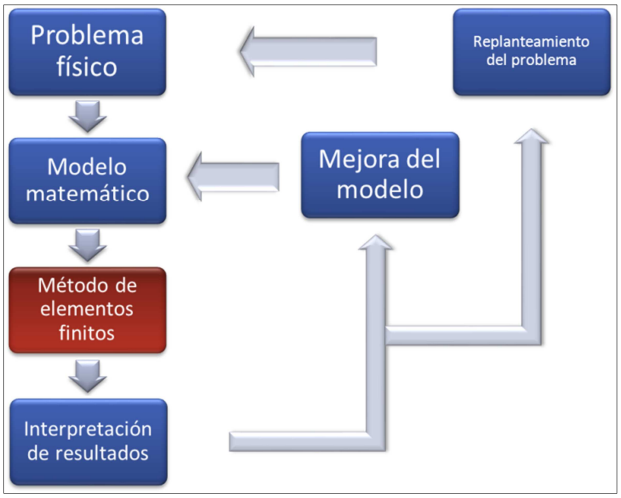

Figura 2.11: Planteamiento genérico de una metodología usando MEF.

El problema físico, inicialmente se pasa a un modelo definido por parámetros matemáticos, esto es, realizar simplificaciones del sistema real a través de las relaciones que gobiernan el proceso a estudiar.

Luego, este modelo matemático pasa por un análisis de elementos finitos que entrega resultados sobre el comportamiento de los elementos discretizados. Este resultado debe ser estudiado y contrastado, con el fin de verificar que los valores obtenidos sean consecuentes y no existan errores significativos en relación a otras metodologías probadas o al comportamiento experimental real.

Estos posibles errores pueden ser tratados volviendo a las etapas iniciales del estudio, en primer lugar, es posible que el problema no haya sido correctamente planteado, en este caso debe estudiarse cual es específicamente el problema a considerar y como acotarlo, eliminando elementos que dificulten su estudio. Luego, pueden existir errores en el planteamiento matemático del problema, la existencia de relaciones erradas o poco precisas puede mermar lo que el método de elementos finitos haga.

En cuanto al análisis de elementos finitos a realizar, en la siguiente figura se desarrolla específicamente los alcances y posibles errores que aquí pueden presentarse:

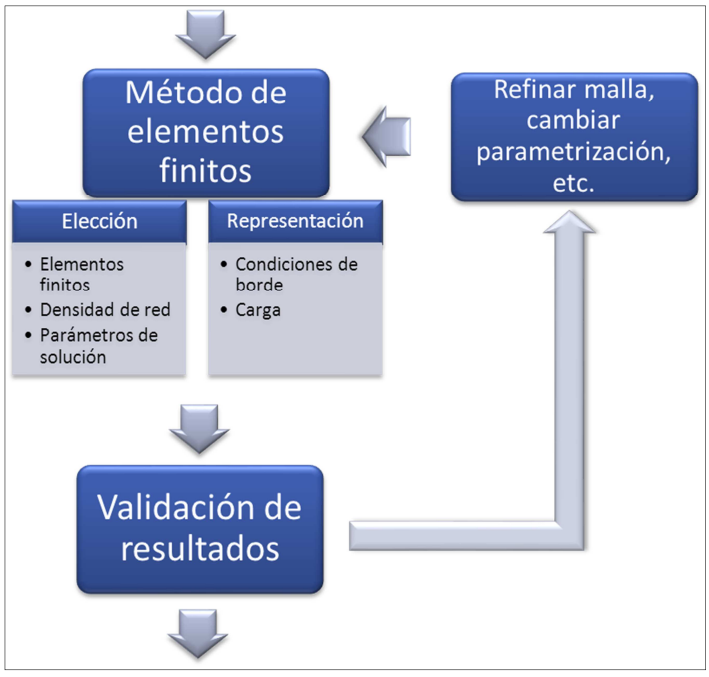

Figura 2.12: Detalle, planteamiento de problemas usando MEF.

El método de elementos finitos consiste en una etapa de pre-procesamiento, que según lo indicado por [20], se compone de:

- Especificar la geometría a utilizar.
- Realizar el enmallado del modelo.
- Caracterizar los materiales.
- Aplicar condiciones de borde y restricciones del modelo.

Posteriormente, se realiza la etapa de procesamiento, en que se efectúan los cálculos para el sistema subdividido en N ecuaciones con N incógnitas cuyos elementos adyacentes les generan una relación y cuya entrada es iterativa, pudiendo necesitar recalcular todas estas ecuaciones para la obtención de un error medido razonable. Estos resultados deben tener una validación previa al paso de análisis del resultado, la cual debe poder definir si el estudio del problema ha sido planteado de la forma correcta. En caso de no ser así, deben realizarse ajustes en el modelo tales como ajuste de malla o cambio de parámetros según corresponda.

Finalmente, existe una etapa de post-procesamiento en que se realiza el cálculo de magnitudes derivadas de las ecuaciones del procesamiento y se presentan los datos de una cierta forma que facilite el análisis al usuario del software.

A continuación se realiza un pequeño detalle con las características de cada paso de pre-procesamiento que se desarrollará en capítulos posteriores.

2.3.2.1. Modelamiento geométrico

Usualmente los elementos de estudio en el “mundo real” son estructuras complejas por lo que se hace necesario asumir simplificaciones en la realización de modelos, con esto se producen geometrías más manejables tanto para el diseño como para la realización de los cálculos asociados al método.

Este punto adquiere relevancia debido a que el detalle de la geometría permite una mayor precisión en el cálculo, pero al mismo tiempo complejiza el modelo y aumenta el tiempo de computación pudiendo verse la aplicación del método restringida inclusive por las restricciones en el software y hardware.

2.3.2.2. Enmallado

Esta es la etapa que consta de convertir el continuo en elementos finitos definiendo una forma geométrica para la malla e intentando mantener un equilibrio entre el tamaño de los elementos y los grados de libertad, la forma de la malla tiene inferencia en esto y además en la simplificación de las ecuaciones del sistema pudiendo hacer variar la velocidad de convergencia del método según la forma escogida.

Al igual que en la etapa previa, el nivel de refinamiento del enmallado limita el nivel de complejidad para su posterior procesamiento.

2.3.2.3. Caracterización de materiales

Para una correcta resolución de los problemas deben caracterizarse los elementos presentes según el problema a resolver. Así, valores como la conductividad en un problema electrostático o el módulo de Young en un problema de estrés mecánico son fundamentales para entregar un resultado razonable.

Los materiales se caracterizan por dominios, es decir, objetos geométricamente distinguibles de forma independiente del enmallado que se le dé al sistema. Naturalmente, mediante el uso de planos de corte u otros medios de separación, pueden distinguirse varios materiales en un medio formado por una única forma primitiva.

2.3.2.4. Condicionamiento del modelo

La delimitación del problema, mediante condiciones de borde y especificación de las funciones, limita las soluciones y permite al usuario caracterizar el problema de interés. Existen diversas alternativas de software comercial que permiten la aplicación de esquemas de cálculo predefinidos y el uso de condiciones de borde de fácil aplicación mediante el uso de la interfaz gráfica y las opciones de modelación.

2.3.3. Método de elementos finitos aplicado al cálculo de campos electrostáticos

De forma similar a otros procesos físicos, los fenómenos electromagnéticos pueden ser modelados mediante ecuaciones diferenciales parciales (EDP).

Para este trabajo, se considerará que el campo eléctrico de interés es generado por cargas estáticas (para el supuesto sólo se requiere que su movimiento sea uniforme), por lo que es posible omitir los términos que conllevan variables de tiempo. Los siguientes puntos están basados en los trabajos de Escudero y Fernández [[9],[11]]

2.3.3.1. Ecuaciones diferenciales para campo electrostático

El campo electrostático está gobernado por la forma diferencial de una de las ecuaciones de Maxwell, la denominada Ley de Gauss:

$$\nabla \cdot \mathrm{D} = \rho \tag{2.5}$$

$$\mathrm{D} = \epsilon \mathrm{E} \tag{2.6}$$

De las expresiones anteriores se llega a:

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathrm{E}) = \rho \tag{2.7}$$

Donde E es el campo eléctrico en volts metro, ϵ la permitividad dieléctrica del medio en Faraday por metro, ρ la densidad de carga y D la densidad de flujo eléctrico en Coulomb por metro.

Para el caso particular de campos estáticos, se puede relacionar el campo eléctrico con la función escalar de potencial electrostático (ϕ).

$$\mathrm{E} = -\nabla\phi \tag{2.8}$$

Por lo tanto, se puede rescribir la ecuación como la ecuación de Poisson:

$$\nabla \cdot (-\epsilon\nabla\phi) = \rho \tag{2.9}$$

La cual, en el caso que ϵ sea constante en el dominio, tomará la forma:

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \tag{2.10}$$

Cuando ρ = 0, es decir, la densidad de carga superficial es nula, se llega a obtener la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2\phi = 0 \tag{2.11}$$

2.3.3.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde para estas ecuaciones son de dos tipos:

a) Dirichlet: El potencial es conocido para algunas zonas de la frontera.

$$\phi = \phi(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z}) \tag{2.12}$$

b) Neumann: El valor de la derivada del potencial es conocido, en todo el resto del borde del dominio de solución.

$$\nabla\,\phi = \mathrm{q}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z}) \tag{2.13}$$

Donde la función $\mathrm{q}(.)$, en este caso, corresponde a la distribución de carga superficial en la frontera.

En algunos casos, estarán presentes ambos tipos de condición de borde en un mismo límite en lo que se conoce como condición de borde mixta.

2.3.3.3. Planteamiento variacional

En lugar de resolver la ecuación diferencial directamente, se prefiere tratar de encontrar la función que minimiza el funcional equivalente a dicha ecuación.

Para este tipo de ecuaciones el funcional equivalente tiene la forma:

$$I(\phi) = \frac{1}{2}\int_{\Omega} [\nabla\phi \cdot (\epsilon\nabla\phi) - \rho\phi]d\Omega + \int_{\Gamma} q\phi d\Gamma \tag{2.14}$$

Es interesante constatar que este funcional coincide con la función de energía almacenada en el sistema. Por lo tanto, la interpretación física es que la función de potencial que satisface la ecuación de Poisson es aquella que también hace mínima la energía total almacenada en el campo electrostático.

3. Estado del Arte para el Diseño de Electrodos en Sistemas HVDC

El presente capítulo tiene por objetivo presentar al lector el estado del arte del diseño de electrodos de puesta a tierra en base a la experiencia internacional. De este modo, pretende entregarse una guía de procedimiento que incluye: principios de diseño, métodos aplicables y consideraciones a ser tomadas en cuenta en la realización de un proyecto de este tipo. Como base se considerará el trabajo de Carrasco [3], los lineamientos de diseño realizados por Cigré [6] y "HVDC Ground Electrode Design" de EPRI [8].

Las especificaciones y documentación asociadas al proyecto de un electrodo de puesta a tierra está usualmente separado del proyecto de la línea HVDC y sus terminales, por lo que se pueden definir las etapas de este proyecto como independientes, tomando las características de la interconexión como datos.

En base a la bibliografía [8], las etapas de este tipo de proyecto son:

- Selección de sitio
- Diseño de electrodo
- Consideraciones especiales
- Testeo y monitoreo

Para clarificar el funcionamiento del proceso, cuando sea pertinente, se aplicará la metodología de diseño a un proyecto ficticio con características similares a las publicadas para el Proyecto Hidroeléctrico Aysén.

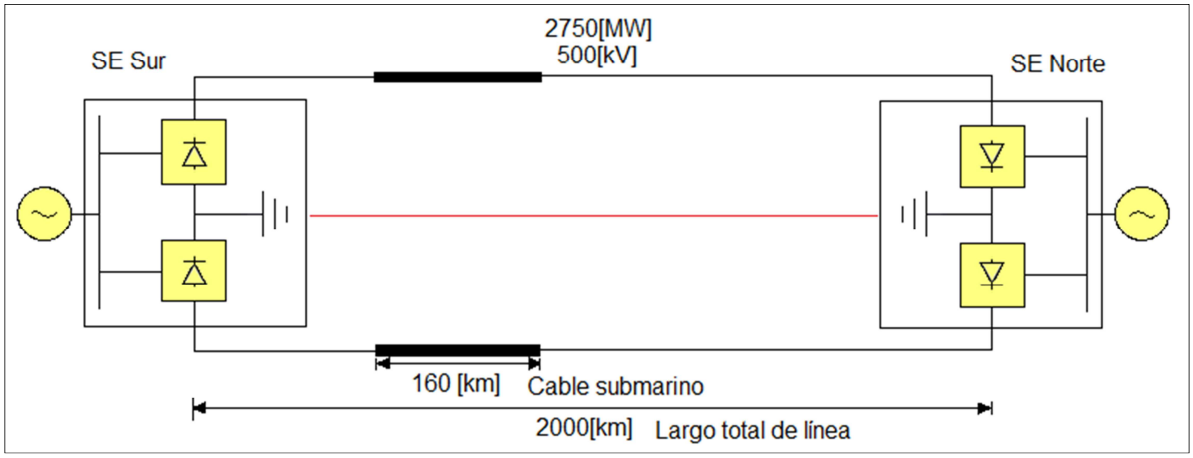

Figura 3.1: Caracterización del sistema en estudio.

A partir de estos datos se puede tener información básica para empezar el procedimiento de diseño:

- El nivel de corriente de diseño para el electrodo.
- A partir de la configuración, bipolar en este caso, se puede estimar la operación del electrodo.
- La localización de las subestaciones convertidoras.
- Selección de los tipos factibles de electrodo según locación. La forma y profundidad deben ser estudiados en instancias posteriores.
- Infraestructura cercana perteneciente a *utilities* y otras instalaciones existentes, restricciones ambientales y legales.

Con estos y otros criterios de diseño, a detallar en la sección 3.2, se puede comenzar con el reconocimiento de sitio.

3.1. Selección de sitio

De forma muy resumida este procedimiento consiste en:

- Reconocer zonas factibles en base a distintos criterios de selección y realizar una preselección de aquellos más adecuados;
- Recolectar datos y realizar estudios para el refinamiento de la selección previamente realizada, mediante este proceso se excluye la mayoría de las posibles localizaciones;
- Finalmente, se realiza la selección final entre los candidatos restantes en base a comparación y/o a criterios complementarios.

A continuación se describe en detalle cada una de estas etapas intentando detallar y clarificar los procedimientos a seguir.

3.1.1. Selección preliminar de sitios

Conocidos los terminales de la interconexión HVDC, puede realizarse en torno a un mapa de la zona un perímetro que entregue una región teórica factible para la ubicación del electrodo de puesta a tierra.

En la Figura 3.2 se presenta un ejemplo de la metodología propuesta, a la izquierda una subestación “norte” y a la derecha una subestación “sur” marcadas por un cuadrado y dos círculos concéntricos, delimitando límites interno y externo para la instalación, el interno para evitar problemas de corrosión e interferencia descritos más adelante, y el externo para no encarecer el proyecto ni extender la línea dedicada al electrodo en demasía.

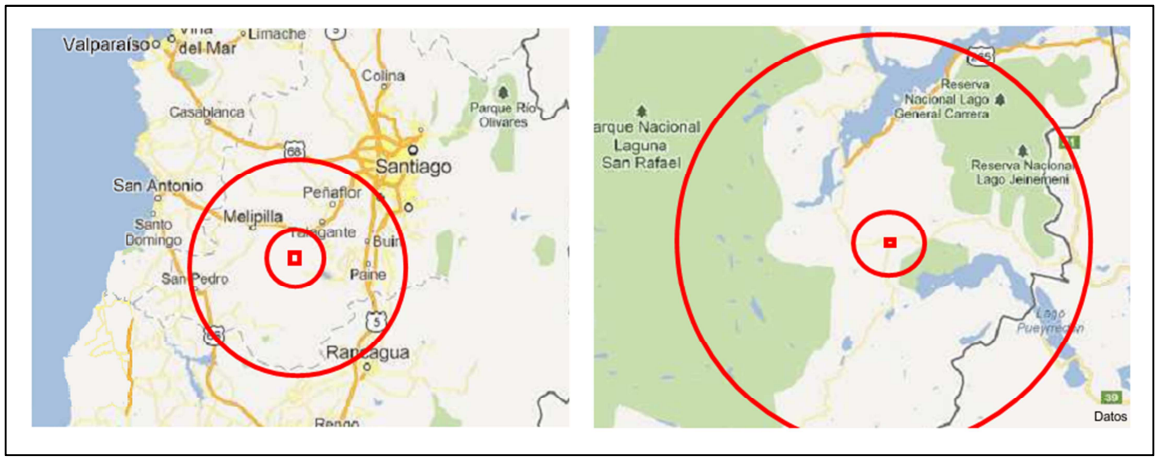

Figura 3.2: Ejemplo en base a una línea de transmisión tipo. Mapa: Google Maps.

Usando información disponible tal como aquella que se pueda obtener de estudios previos o cercanos, mapas geográficos detallados, herramientas de software como Google Earth, sondeos realizados para minería o estudios geográficos universitarios; es posible determinar la geología de la zona, pudiendo así estimar los lugares con mejores probabilidades de mostrar características eléctricas, termodinámicas y estructurales para este tipo de proyecto.

Junto a lo anterior, en base a una pauta de criterios básicos se establecen los sitios candidatos. Ejemplos de estos criterios son indicados a continuación en base a lo descrito en la sección 9.6 de [18] y la investigación de otros proyectos realizados y en ejecución:

- Distancia razonable de la subestación para evitar efectos negativos a detallar con posterioridad.
- Baja resistividad de terreno.
- Distancia a centros poblados y estructuras mayores.
- Accesibilidad.
- Cercanía a fuentes de agua.
- Impacto mínimo en el medio.
- Topografía.
- Facilidad en la obtención de la franja de servidumbre de la línea del electrodo.
- Costos totales de la línea y el electrodo.

Las locaciones seleccionadas deben ser estudiadas en detalle, con el fin de seleccionar la mejor alternativa considerando datos lo más certeros posibles. Con la intención de conocer en mayor detalle las características de los sitios candidatos, en etapas posteriores, se debe hacer un reconocimiento de estos: para el caso de electrodos terrestres o de costa, un reconocimiento aéreo o acceso directo a la zona a

estudiar y para el caso marino estudios desde botes aptos o mediante buzos. Las fotografías que puedan obtenerse son de interés como futuras referencias o como comparación de línea base.

Es necesario hacer notar que los criterios a seguir son propios de cada proyecto y dependerán de las características exclusivas de este, por ejemplo, en caso de un electrodo ubicado en la costa un criterio adicional podría ser la fuerza del oleaje en el sitio escogido.

En [30] se entrega la siguiente tabla con aspectos de diseño para diferentes tipos de electrodos en función de varias características que pueden ser considerados como filtro en esta etapa.

Tabla 3.1: Aspectos de diseño para electrodos.

	Marino	Costa (estanque)	Costa (enterrado)	Terrestre	Terrestre vertical
Distancia a SSEE [km]	> 10	> 10	> 10	> 10	> 0
Interferencia	Posible (-)	Posible (-)	Posible (-)	Posible (+)	Posible (+)
Stress mecánico	Corrientes submarinas, congelamiento	Oleaje, congelamiento	Oleaje, mareas, congelamiento	Vientos	Alta presión
Stress térmico	Ninguno	Ninguno	Secado	Secado	Secado
Fuerza de campo eléctrico [V/m]	≤ 2	≤ 45	≤ 45	≤ 45	≤ 45

Fuente: [30]

La tabla presenta, para los tipos básicos de electrodos, consideraciones básicas de diseño a considerar *a priori*. Las primeras dos filas presentan criterios relativos a la interferencia con otras instalaciones, las siguientes dos las solicitaciones mecánicas y térmicas, la última presenta limites sugeridos por el autor para el campo eléctrico.

En el caso de estudio, el electrodo será terrestre, por lo que se requiere asegurar que las características del terreno mantengan la suficiente humedad y permitan la conducción del calor y la electricidad. Además, deben tener una topografía apropiada, lo que conlleva un terreno de dimensiones acorde a las estimaciones iniciales y ser llano para requerir la menor intervención posible.

3.1.2. Fase de estudios

Luego de la preselección de sitios, deben llevarse a cabo estudios in situ para determinar la viabilidad de la realización del proyecto en estos. Dichos estudios conllevan principalmente aspectos técnicos, que incluyen propiedades eléctricas y termodinámicas del terreno, y aspectos geofísicos y geográficos.

3.1.2.1. Mediciones y estudios

Para la selección de la locación definitiva de los electrodos, se llevan a cabo estudios en terreno de los parámetros que influyen sobre el comportamiento de estos. Algunos de estos estudios deben considerar [8]:

Aspectos técnicos

- Conductividad eléctrica: se debe conocer la resistividad del terreno a varios niveles de profundidad. En el caso específico de los electrodos en contacto con el mar, se asume como un factor menos crítico pues se espera que la corriente circule en el agua marina cuya resistividad es, en promedio, menor que la del terreno, sin embargo, deben reconocerse los suelos adyacentes al agua.
- Conductividad térmica: es importante conocer la capacidad de transmitir calor. Por las propiedades intrínsecas del agua, este factor también es relevante principalmente para el caso terrestre.
- Capacidad térmica: corresponde al cociente entre la energía calórica transferida a un sistema y el cambio de temperatura que experimenta.
- Nivel de humedad en el suelo: el nivel de humedad en el suelo tiene relación directa con las propiedades eléctricas y térmicas del terreno.
- Clima: Debe conocerse las variaciones climáticas en sitio tales como hielo, nieve, precipitaciones, temperatura, presión del viento entre otros.

Las mediciones de estos factores deben realizarse, típicamente, por al menos 2 años con el fin de abarcar los efectos de estacionalidad.

Aspectos geofísicos

- El terreno debe estar bien nivelado, o al menos no tener pendientes importantes. En apariencia debe estar libre de señales de salientes rocosas y otros símbolos de material de alta resistividad en capas superficiales de terreno.
- Es importante para el diseño del electrodo y los materiales empleados para este tener los parámetros geotécnicos: profundidades de congelamiento, tipo de suelo, clasificación sísmica u otras cargas mecánicas aplicadas sobre el lugar de instalación.

- Aspectos específicos en los casos de electrodos instalados en el mar: oleaje, mareas, corrientes marinas, la posible infiltración de agua dulce que puede variar las propiedades del entorno.

Aspectos geográficos

- Accesibilidad del sitio, para la construcción y mantenimiento. Esto incluye caminos, estacionamiento de vehículos, instalación de la línea del electrodo entre otros.
- Facilidad para construir y mantener infraestructura asociada a la construcción, drenaje de lluvia durante obras y zonas dedicadas al acopio de material.
- Distancias mínimas a accidentes geográficos, instalaciones y zonas pobladas. Estos factores pueden significar el descarte automático de las locaciones.

Algunos de estos parámetros, en particular aquellos pertenecientes a datos climáticos, geográficos y geofísicos; pueden conocerse a partir del reconocimiento de sitio o de la bibliografía existente, por lo que pueden utilizarse para la eliminación o reconsideración inmediata de localizaciones de instalación, pudiendo así evitar los costos de investigar en estos sectores.

Pese a esto, en los casos que no puedan ser eliminados las características deben constatarse en terreno. Factores como tipo y distribución de suelo en el caso terrestre, suelos adyacentes, oleaje y mareas en los casos de costa y marino, y más en general, problemas de erosión, deslizamientos, fallas geográficas e infiltraciones, deben ser revisados e investigados a lo largo de periodos de estudio equivalentes a los dedicados a aspectos técnicos.

A continuación se especifican algunas de las pruebas a realizar en terreno.

3.1.2.1.1. Pruebas en muestras de suelo

La realización de toma de muestras en terreno considera análisis químicos de la composición de terreno que incluyen: niveles de humedad, porosidad, acidez, conductividad térmica, capacidad calórica y salinidad [25].

Como se menciona en el capítulo 2, la humedad, salinidad y temperatura condicionan la resistividad eléctrica del sitio.

3.1.2.1.2. Pruebas de resistividad de terreno

Las pruebas de resistividad son cruciales en la realización de todo proyecto de puesta a tierra, el resultado de estas determinará los valores de resistencia y tensión en el electrodo, más aún para HVDC es, junto a la corriente, uno de los factores más

relevantes en el flujo de campo eléctrico. Si bien inicialmente se puede tener información genérica sobre la estructura de suelo dada por cartas geológicas, es necesario tener valores cercanos a la realidad por lo que se ejecutan mediciones en el lugar.

Debe tenerse en consideración que cuando se transmite corriente entre dos electrodos, la distribución de corriente es tridimensional. Esto implica que la distribución por su comportamiento característico buscara vías que le ofrezcan la menor resistividad posible, buscando agua salada o capas de menor resistividad a diversas profundidades. Por lo tanto, a menos que la geología a nivel regional sea extremadamente simple, el proceso de medición no está exento de complicaciones.

Por lo tanto, como resultado de este estudio debe tenerse un perfil eléctrico y/o una calicata eléctrica, que consiste en la investigación de las variaciones horizontales en el terreno, y los sondeos eléctricos que estudian las propiedades de la variación entre los estratos verticales llegando a importantes niveles de profundidad.

Métodos de inyección de corriente

Los métodos generalmente utilizados para la medición de resistividad de suelo consisten en el uso de 4 electrodos, un par de ellos se emplea para inyectar corriente de baja frecuencia y los otros dos para medir la diferencia de potencial producida por esta corriente. Un esquema básico de esto se muestra en la Figura 3.3.

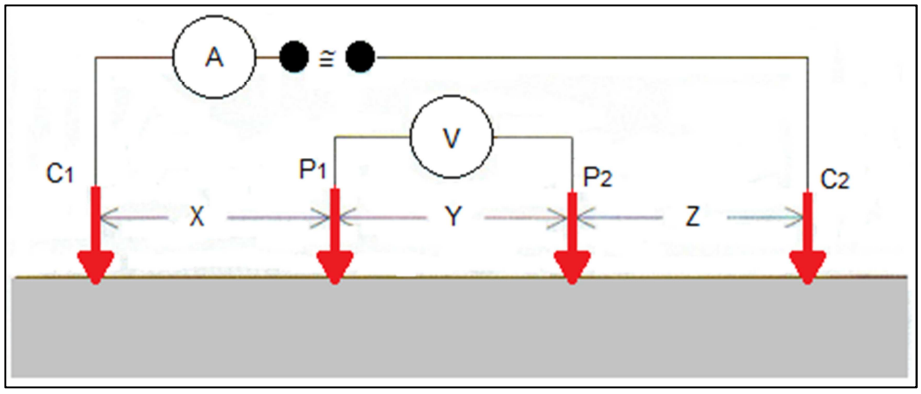

Figura 3.3: Esquema de medición con 4 electrodos.

En este esquema, los electrodos mediante los cuales circula la corriente se designan electrodos de corriente (C_1, C_2), por otro lado, los electrodos que realizan la medición se denominan electrodos de potencial (P_1, P_2). Es importante que en el voltímetro la impedancia sea lo suficientemente alta para que la corriente en el circuito de los electrodos de potencial sea pequeño y se reduzca el error en las mediciones.

Existen múltiples configuraciones [[28],[24]], pero las más utilizadas son Wenner y Schlumberger, las cuales se describen a continuación:

- En la configuración Wenner los electrodos se ponen en línea recta, y a una distancia A fija entre sí (X=Y=Z=A). En base a esta configuración se obtiene una resistividad aparente de la forma:

$$\rho_a = \frac{2\pi V}{I} \cdot \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{1}{A} - \frac{1}{2A} - \frac{1}{2A}} = \frac{2\pi VA}{I} \tag{3.1}$$

- En la configuración de Schlumberger los electrodos se ponen en línea recta, con los electrodos de potencial al centro a una distancia pequeña entre sí (Y=A), mientras que los de corriente se disponen simétricamente a una distancia mayor (usualmente se escoge X=Z=$n \cdot A$, donde n es un número entero). A partir de esta configuración se puede obtener la resistividad aparente de la expresión:

$$\rho_a = \frac{\pi VA \cdot n(n+1)}{I} \tag{3.2}$$

Este método es útil para la medición de resistividades en capas superficiales y es el más utilizado para puestas a tierra convencionales en AC, mas no alcanza los estratos más profundos que resultan ser de interés en el caso de los electrodos.

Comparativamente el método de Schlumberger logra mejores resultados en pruebas de predicción de suelo y requiere mover solo los electrodos de corriente por lo que resulta más cómodo y eficiente en campo. Sin embargo, Wenner podría presentar algunas ventajas en cuanto a la capacidad de sondear diferencias en terreno no-homogéneo [27].

Métodos electromagnéticos [1]

Existen dos categorías de métodos electromagnéticos según el tipo de medición a realizar, estas pueden ser en el dominio del tiempo o la frecuencia. Independientemente de la medición a realizar, el principio fundamental en que se basa el método es el mismo.

Los métodos electromagnéticos operacionalmente consisten en la aplicación de una corriente eléctrica variable a una espira que ejerce como fuente. Esta corriente genera un campo magnético primario que, a su vez, induce corrientes en el subsuelo. La corriente se interrumpe y se mide el campo magnético secundario inducido por las corrientes de conducción en el suelo, el cual entrega una respuesta transiente detectada a través de una espira u otro dispositivo receptor.

Este procedimiento se ilustra en la siguiente figura:

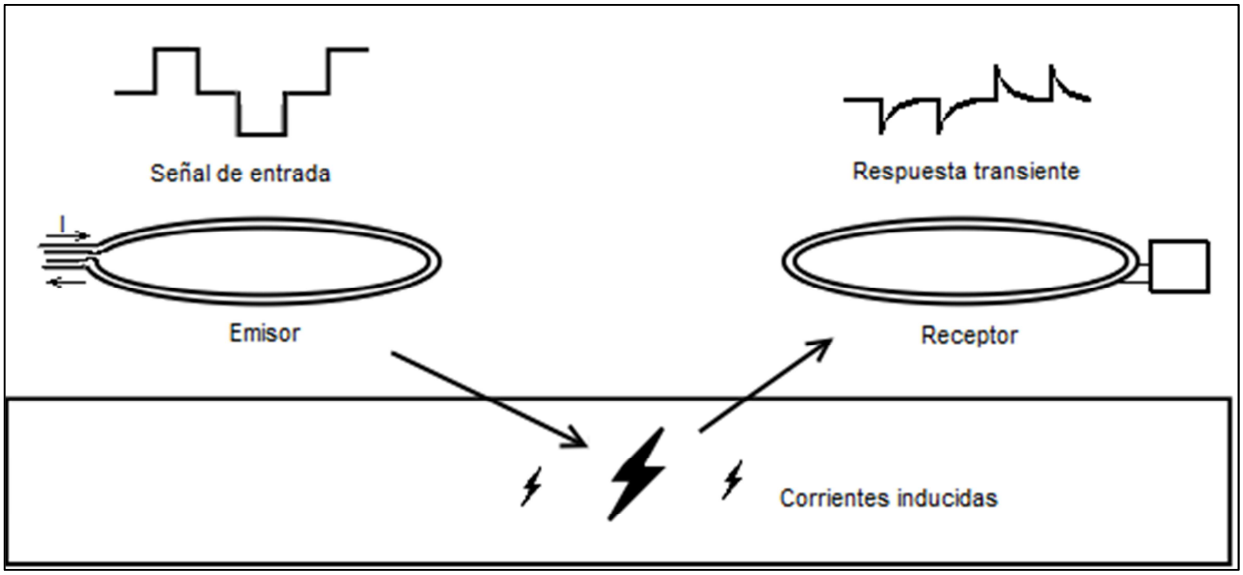

Figura 3.4: Esquema de funcionamiento del método TEM para mediciones de resistividad.

Las corrientes inducidas en el terreno se distribuyen por difusión, y el comportamiento de éstas varía según el tamaño, la forma y la resistividad del terreno. Según la resistividad del terreno varía tanto la amplitud como el decaimiento del campo percibido por el receptor.

La profundidad de penetración de este método es:

$$H_{penetración} = \sqrt{k\frac{t}{\mu\sigma}} \tag{3.3}$$

Donde, t es el tiempo de exposición, k una constante de la configuración de la fuente (en el rango [3,3.5]), μ y σ son la permitividad magnética y la conductividad respectivamente.

Al tratarse de un método inductivo, no existen problemas con la inyección de corriente en ambientes muy resistivos como ocurre, por ejemplo, con los métodos previamente mencionados.

Para el procesamiento de datos, la inversión de la curva de resistividad aparente se hace a partir de mediciones 1D de la resistividad superficial, lo que le hace de interpretación compleja pues se ve afectada por efectos de 2D y 3D que provocan distorsión en las mediciones obtenidas.

Medición magnetotelúrica (MT) [23]

Según la teoría tras este sistema la resistividad de la tierra puede ser determinada a partir del campo eléctrico E y el campo magnético H, mediante la relación:

$$\rho = 0.2\,T\,\left|\frac{E}{H}\right|^2\,[\Omega m] \tag{3.4}$$

Donde ρ es la resistividad, E el campo eléctrico en [V/m] y H el campo magnético en [nT], mientras T es el periodo (o inverso de la frecuencia). Por tanto, mediante la medición simultánea de los campos eléctricos y magnéticos se determinará la resistividad de la tierra.

En su esquema más simple, el método magnetotelúrico consta de líneas eléctricas para la medición de campos eléctricos (en una o más direcciones) y espiras en las mismas direcciones para la medición del campo magnético como se ilustra en la Figura 3.5. Se puede obtener un mayor grado de precisión realizando esquemas más complejos que incluyen mediciones a mayores distancias y en distintos ángulos.

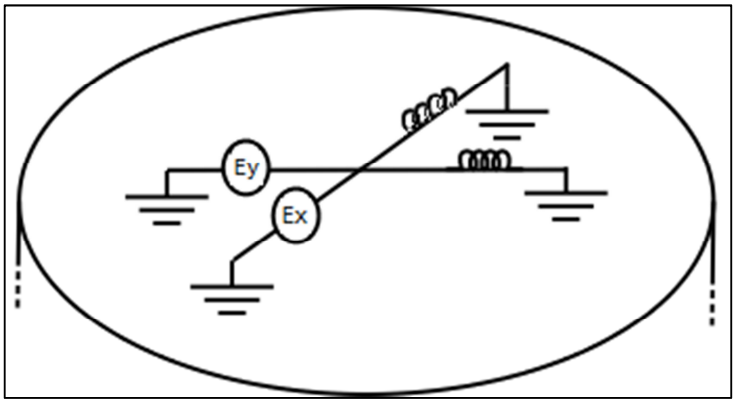

Figura 3.5: Esquema básico para medición magnetotelúrica.

Es particularmente destacable que al tratarse de un método que utiliza las corrientes naturales terrestres no emplea tantos recursos como otros métodos de medición.

Otro valor relevante es el nivel de penetración que alcanza la medición, este valor va dado por la expresión:

$$\mathrm{z} = 500\sqrt{\left(\frac{\rho}{\mathrm{f}}\right)}\,[\mathrm{m}] \tag{3.5}$$

Donde z es la profundidad de penetración, ρ la resistividad obtenida en [Ωm] y f la frecuencia en [Hz].

Este método, si bien no funciona en todos los casos de estudio, permite estudiar capas más profundas de terreno que los métodos anteriormente expuestos.

3.1.2.1.3. Pruebas termodinámicas

Existen para el caso de la conductividad térmica, pruebas de laboratorio y de sitio que pueden ser realizadas. En el caso de las pruebas de laboratorio, por las condiciones en las que se trabaja, no se puede capturar las mismas condiciones de estrés y por ello se prefiere el uso de las pruebas *in situ* [8]. Básicamente, las pruebas en campo consisten en el uso de termocuplas a una profundidad y en un tiempo tal que permita conocer las variaciones estacionales.

La temperatura en sitio se obtiene poniendo puntos de medición en la extensión del sitio de instalación. La prueba utilizada variará de acuerdo al entorno ya sea terrestre o marino.

Con los pasos previamente descritos podrá realizarse una estimación apropiada del comportamiento térmico del suelo.

Maneras de mitigar los efectos del calentamiento son: la introducción de un sistema de irrigación forzada, uso de relleno con materiales higrostáticos, por ejemplo, hormigón o el utilizar una capa mayor de coque debido a sus favorables propiedades térmicas [5].

3.1.2.2. Estudios

Como paso previo a la selección definitiva, además de los pasos anteriormente mencionados es necesario determinar ciertas magnitudes mediante simulaciones y métodos de cálculo para la verificación del cumplimiento de valores mínimos técnicos y de seguridad:

- Voltajes de paso y contacto.
- Máximo gradiente de potencial superficial.
- Resistencia a tierra del electrodo.
- Constante de tiempo para temperatura nominal.
- Elevación de temperatura esperada.

Mediante estudios de campo eléctrico se puede encontrar la tensión en la superficie y extender este estudio para detectar los efectos del campo sobre objetos metálicos y equipos eléctricos en la vecindad del electrodo. Asimismo, las variaciones térmicas siguen un comportamiento muy similar [2], por lo que el problema se resuelve de forma análoga aunque con distintas áreas de influencia, condiciones de borde y considerando la dependencia en el tiempo.

Estos efectos pueden ser modelados sin llegar a la etapa de un diseño más elaborado, pues dependen de la corriente de electrodo, la resistividad de terreno, la

separación entre electrodos, la orientación del campo eléctrico y el tamaño de la estructura. Debido a la magnitud del terreno a considerar por las dimensiones de los electrodos y la separación entre ellos, simplemente puede trabajarse con un modelo sencillo de carga puntual sin profundizar en datos del electrodo tales como la forma y los materiales empleados.

Estos estudios en su forma analítica y mediante el método de elementos finitos, forman parte del cuerpo central de este trabajo, por lo que su descripción detallada será realizada en extenso en los siguientes capítulos.

3.1.2.2.1. Impacto ambiental

Deben ser identificadas las posibles fuentes de riesgo cercanas, aquellos puntos donde puede existir corrosión, zonas de riesgo por diferencia de potencial o inducción de corrientes. Por ende, se recomienda particularmente la realización de un catastro de estructuras que involucren metales en cercanías del potencial lugar de emplazamiento.

Además de considerar efectos en otras estructuras o seres vivos, deben ser tenidos en consideración los efectos sobre el mismo electrodo, estos son acumulativos y tienen relación directa con el nivel y tiempo de uso.

El efecto visual del electrodo, usualmente, se considera mínimo por encontrarse enterrado/sumergido. Por otro lado las líneas de éste, debido a ser de corriente continua, tienen campo unidireccional lo que permite que posean aislación reducida por lo que no tienen mayores inferencias estéticas en el paisaje.

3.1.3. Selección definitiva de sitio

Para la selección definitiva de sitio una metodología a seguir es realizar un ranking entre las alternativas resultantes de los procesos previos en base a los criterios de las etapas anteriores, esto puede incluir un refinamiento en los criterios o nuevos tópicos a considerar. Por ejemplo, se puede realizar utilizando una tabla como la que se presenta a continuación:

Tabla 3.2: Tabla de calificación para alternativas de locación de electrodo de puesta a tierra.

Característica	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Localización a más de 10[km] de SSEE	1	2	3
Localización a más de 5[km] de infraestructura o lugares poblados	2	1	3
Humedad adecuada en toda época del año	1	3	2
Accesible con la menor intervención	3	1	2
Libre de riesgo sísmico o deslizamientos	1	3	2
Minimizar impacto ambiental	2	1	3
CAPEX y OPEX	1	3	2
Requiere menor dificultad para ingeniería y construcción	1	2	3
TOTAL	12	16	20

En este caso, la mejor alternativa es la 1, por supuesto, esta metodología puede modificarse asignando distinto valor a cada tema o se puede emplear derechamente otras opciones de evaluación para comparar las alternativas existentes.

Además, también es importante tener claro la propiedad del terreno, negociar con la menor cantidad posible de propietarios es lo ideal, y los permisos para estudios, instalación y operación del electrodo en locación.

3.2. Definición del diseño

Los diseños a realizar son dependientes de las condiciones de funcionamiento de la línea, que entregará los criterios eléctricos para el dimensionamiento, y los sitios definidos para su instalación. Mediante las alternativas de prediseño puede establecerse un presupuesto preliminar con los costos asociados a materiales y manufactura de la puesta a tierra.

Los parámetros de diseño iniciales van dados por las características de la línea de transmisión, su configuración, materiales, los efectos que pudiere tener en su entorno. Es fundamental para este fin, conocer los aspectos operativos de la línea, incluyendo la corriente de carga estimada para el electrodo y el tiempo esperado de uso.

Otro elemento crucial es la resistividad del terreno, pues esta es directamente proporcional a la resistencia que alcanza el electrodo y define su comportamiento.

3.2.1. Corrientes del sistema

Como se explica en el capítulo previo, la función básica del electrodo es transferir la corriente del sistema desde los conductores a tierra. Esto implica que el electrodo requiere poseer la capacidad de tolerar la corriente del sistema y estar disponible para operar por la extensión que implique la vida útil del proyecto [25].

En el ejemplo, la corriente circulante por los terminales conversores se espera en un valor de 2750[A] dc en operación bipolar y 1375[A] dc en operación monopolar. No se prevén sobrecargas continuas ni ocasionales para la operación del sistema.

Por ende, cada electrodo estará dimensionado para una operación continua a 1800[A] dc. Sin embargo, aún sin considerar sobrecargas, debe entregarse un margen en el diseño del electrodo con el fin de soportar contingencias, para obtener los 1800[A] descritos se suma un 30% al valor estimado para operación monopolar y se redondea.

En caso de querer tener un diseño más conservador pueden tomarse criterios de sobrecarga continua, haciendo algo similar a la estimación realizada para un valor del 150% y una sobrecarga temporal del 200%.

3.2.2. Tiempo de operación

Este criterio de diseño consiste en anticipar una tasa de salidas de operación para uno de los polos del sistema. Esto junto a la operación normal por desbalance, los factores de carga y modos de operación planeados para el sistema entregan un valor preliminar para cuantificar la vida útil estimada para el electrodo, que debiese ser la misma a considerar para el sistema.

Durante operación bipolar normal, el electrodo sólo transmite pequeñas corrientes provocadas por el desbalance entre los polos de forma relativamente constante. Planteado de otra forma, a diferencia de sistemas monopolares u homopolares en los cuales los electrodos debiesen funcionar de forma continua para poder transmitir a carga completa, los electrodos en el caso ejemplo, serán utilizados como vía de retorno sólo bajo ciertas circunstancias.

También, en configuración bipolar, existe la alternativa de implementar un esquema de transferencia para minimizar la operación monopolar con electrodos para el caso de una falla que no sea en la línea (caso poco frecuente). Este esquema funciona tomando ventaja de que, al quedar un polo desenergizado por mantenimiento o falla en el funcionamiento de los conversores u otros elementos distintos a la línea, el conductor desenergizado puede ser empleado como retorno metálico mediante un esquema de conmutación que conecte el conductor a un punto neutro [28]. Para utilizar este esquema es necesario que el sistema se mantenga equilibrado, es decir, que en ambos

extremos del polo a utilizar la conexión sea directa al punto neutro sin pasar por el conversor.

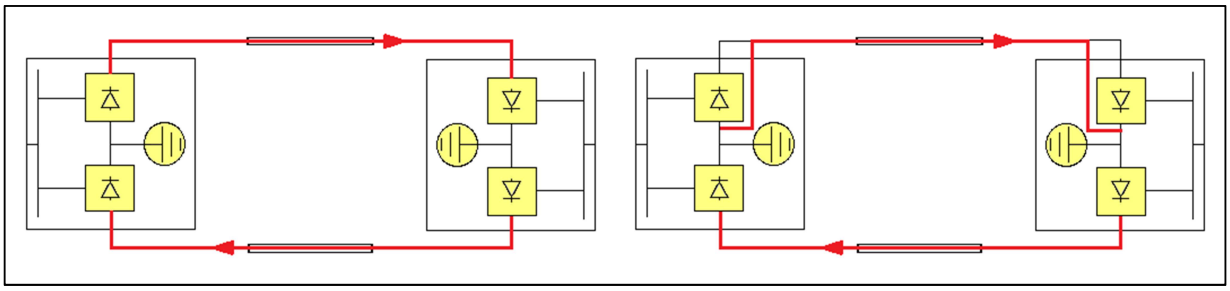

Figura 3.6: Esquema en funcionamiento normal (izquierda), esquema con retorno metálico por línea (derecha).

Independientemente de estos métodos para mejorar la confiabilidad del sistema, las exigencias preliminares de operación para los electrodos en las subestaciones Norte y Sur son:

- La corriente continua nominal máxima de operación es 1800 [A].
- El periodo asumido para pérdidas admisibles de material debido a corrosión electrolítica por parte del electrodo, sus componentes e infraestructura aledaña se supondrá en 40 años.
- Se suele suponer un criterio conservador para las posibilidades de falla (peor caso).
- Se debe considerar al menos 1 pérdida importante en el sistema para la vida útil del sistema, esto supondrá una operación monopolar de seis meses (tiempo supuesto para la reposición del polo dañado, esto puede significar un reemplazo de conductor o daños en el tramo submarino).
- Una tasa de salidas de funcionamiento de un polo por mantenimiento programado se asume en 1%. Si bien para los casos de mantenimiento de los conversores es factible ocupar la línea del polo en mantenimiento como retorno metálico se asume, como criterio de seguridad para este ejemplo, que el electrodo opera a capacidad nominal el 50% del tiempo de manutención programada.
- Una salida de funcionamiento forzado resultante en operación monopolar, se espera para el 1% del tiempo de operación. En este caso, se asumen los electrodos operando a capacidad nominal el 50% del tiempo de su operación como vía de retorno.
- Para operación permanente, se asume un desbalance de corriente continua en el orden de $\pm$1% de la corriente nominal.
- Durante la instalación y puesta en marcha del sistema de puesta a tierra por electrodos, se requerirá algunas pruebas de operación monopolar, sin

embargo, se espera estas no sean significativas en cuanto a operación demandada para el electrodo por su corta duración.

Los requerimientos de diseño de un electrodo se miden en Ampere-hora de servicio para el tiempo de vida útil del sistema (se asume 40 años). Además para la salida forzada se supondrá una sobrecarga temporal del sistema de 2500[A], y al ser peor caso, se supondrá que las situaciones enunciadas arriba aplican en ambos sentidos, es decir, ambos electrodos operan como ánodos en algún momento:

Tabla 3.3: Cálculo de operación anódica total del sistema.

Descripción	Operación anódica [Ah]		Método de cálculo
	Term. Norte	Term. Sur	
Salida programada	1576800	1576800	$I_{maxDC} \cdot 0.5\% \cdot 50\% \cdot 8760 \cdot 40$
Salida forzada	4380000	4380000	$I_{max_t} \cdot 1\% \cdot 50\% \cdot 8760 \cdot 40$
Desbalance	9636000	9636000	$I_{nomDC} \cdot 1\% \cdot 8760 \cdot 40$
Salida de cable	7884000	7884000	$I_{maxDC} \cdot 50\% \cdot 8760 \cdot 1$
Total	23476800	23476800	

Para los cálculos considerados no se agregan factores de seguridad debido a tomar supuestos conservadores para todos los casos, las salidas de operación naturalmente atenuarán el uso del sistema de forma mayor a la consignada y el desbalance debe ser atenuado mediante algoritmos de control. Las exigencias del electrodo deben ser re-evaluadas en base a la información provista por el proveedor, estudios posteriores de confiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y planificación de operación de la conexión.

3.2.3. Confiabilidad

Existen algunos aspectos básicos de confiabilidad a tener en consideración, tales como las partes expuestas del electrodo no deben tener partes móviles o la calidad de los materiales a emplear. Sin embargo, la confiabilidad es bastante alta de forma natural, por lo que no es necesario contar con partes de reemplazo para uso inmediato [8].

Para mejorar la confiabilidad la construcción del electrodo suele realizarse como un elemento dividido en múltiples secciones con cables que proveen a cada sección para aislar cada subsección individual (Figura 3.7). El número de secciones del electrodo será estimado en base a la corriente del electrodo y a contingencias esperadas.

La densidad de corriente en cada elemento del electrodo debe cumplir como requerimientos:

- La densidad de corriente tolerada por cada elemento debe ser mayor a la esperada.

- Los elementos deben tener la capacidad de operar de forma continua para la operación monopolar más extensa posible (cambio de conductor o sustitución en tramo submarino).
- En caso de salir de servicio una sección, el electrodo debe estar completamente operativo (criterio N-1).

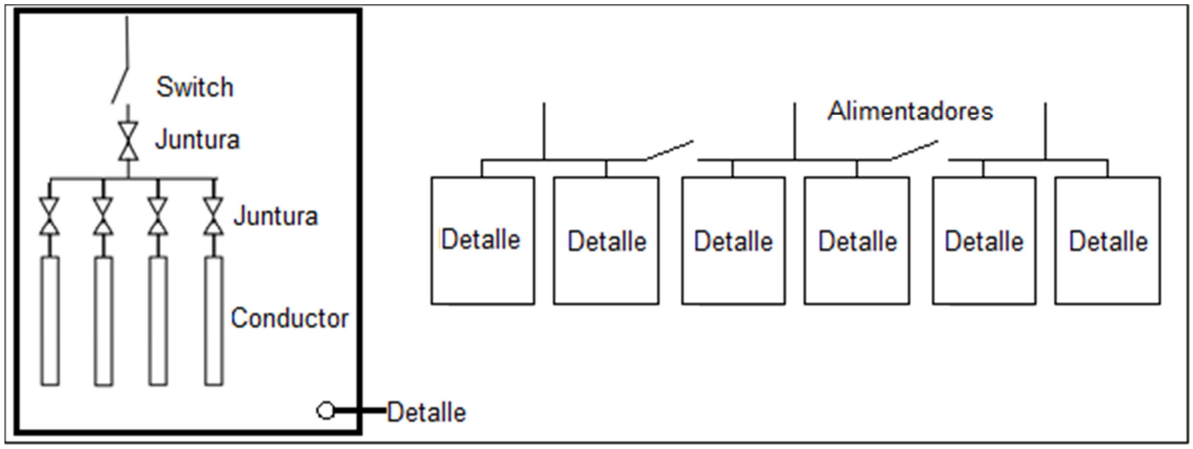

Figura 3.7: Esquema seccionado de conductores.

3.2.4. Seguridad

La seguridad en el diseño de un electrodo se determina mediante la tensión de paso para la máxima corriente inyectada al electrodo y la tensión de toque en objetos expuestos en tierra, y los gradientes de voltaje en agua.

El criterio de seguridad no es la eliminación de los gradientes de potencial, sino que en la prevención de molestias a toda persona o animal sujeta a una diferencia de potencial mediante la reducción de los gradientes.

Para la tensión de paso, la definición es la misma que para el caso alterno (ver [15], [30]), el campo eléctrico generado por el electrodo en operación conlleva una diferencia de potencial entre los pies de una persona o animal caminando en la superficie aledaña al lugar de enterramiento del electrodo. También existe la posibilidad de una diferencia de potencial entre los pies de una persona y una estructura metálica en que se haya inducido una corriente (ej: cercados rurales, tuberías de irrigación, estructuras metálicas expuestas), esto es lo que se conoce como tensión de toque.

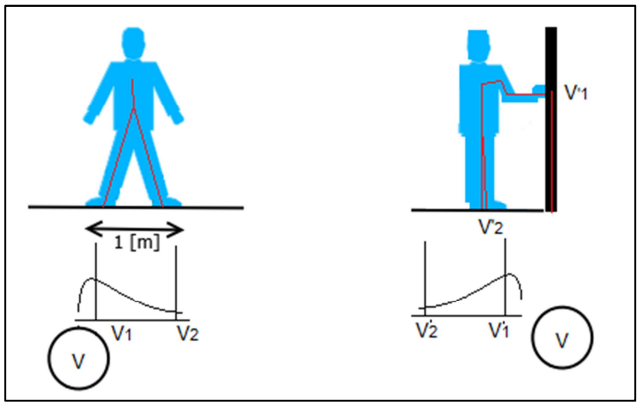

Figura 3.8: Definición de corriente de paso (izquierda) y toque (derecha). Corriente circulante en rojo.

Los efectos de la corriente sobre los seres vivos varían según la trayectoria, intensidad, impedancia y frecuencia que esta posea. Para el caso de la corriente continua, los valores tolerables de referencia se basan en datos experimentales extraídos de pruebas realizadas por Dalziel [7], en base a estos, se determina que el umbral de percepción es del orden de 5 [mA], aproximadamente en razón 5:1 con el valor para el umbral a frecuencia industrial (50 [Hz]).

De acuerdo a la bibliografía consultada [[8],[18],[16]], las expresiones para la tensión de paso y la tensión de toque son:

$$V_{paso} = (R_B + 2R_C) \cdot I_B \tag{3.6}$$

$$V_{toque} = \left(R_B + \frac{R_C}{2}\right) \cdot I_B \tag{3.7}$$

Donde, R_B es la resistencia del cuerpo humano (usualmente 1000[Ω]), R_C es la resistencia de contacto (se utiliza $3\rho_s$, con ρ_s la resistividad superficial del suelo) e I_B que es la máxima corriente recomendada (5[mA]).

Tabla 3.4: Corrientes tolerables, voltajes de paso y gradiente cerca de un electrodo de puesta a tierra DC.

Descripción	Ser humano caminando o de pie	Ser humano acostado	Vaca o caballo de pie
Peso [Kg]	70	70	500
Resistencia del cuerpo [Ω]	1000	1000	140
Resistencia de contacto [Ω]	$6\rho_s$	$3\rho_s$	$3\rho_s$
Sensación (criterio)	Molestia	Dolor	Dolor
Corriente tolerable [mA]	5	22	160
Voltaje [V]	$5+0.03\rho_s$	$22+0.07\rho_s$	$22+0.48\rho_s$
Paso [m]	1	2	2
Gradiente [V/m] (general)	$5+0.03\rho_s$	$11+0.035\rho_s$	$11+0.24\rho_s$

Fuente: [18]

Para el caso del agua, la sensibilidad de las distintas especies al campo eléctrico producido varía en función de: tamaño y peso del animal, forma del cuerpo, resistencia eléctrica de este, resistividad del agua, tipo de corriente y la distribución del campo. La literatura no es concluyente, pero indica que para los peces la operación anódica a 5 [V/m] genera atracción, tetanización a los 20 [V/m] y muerte a los 50[V/m]. Un ser humano puede sentir molestias para el caso de agua de mar en torno a los 2.5[V/m], como criterio de seguridad se emplea un valor de 1.25[V/m] [6], que mantiene seguros a los grandes peces y humanos que puedan tener sus actividades en las cercanías del electrodo.

3.2.5. Vida útil

El electrodo debe mantener sus propiedades y su funcionalidad durante el mismo tiempo de vida útil del proyecto independientemente de su nivel de funcionamiento.

Bajo condiciones normales esto implica que el terreno mantiene sus propiedades durante la operación del electrodo y que las pérdidas de material debidas a corrosión anódica sean porcentualmente bajas y no conlleven un deterioro en las características operacionales del electrodo.

Como valor referencial este periodo debe ser de al menos 30 años.

3.2.6. Temperatura

Un factor crítico en el caso de un electrodo terrestre es el nivel de temperatura al que llega la interfaz electrodo-suelo. En el caso de electrodos de costa y marinos el

calor generado se disipa de forma muy eficiente por las favorables características del agua.

Como criterio básico, el calentamiento del suelo no puede alcanzar más allá de 100℃, por tratarse de la temperatura de ebullición del agua. En la medida que la temperatura aumenta, la resistividad del suelo aumentará a niveles no aceptables. Para el cálculo de esta temperatura debe tenerse en cuenta el valor de la temperatura en el subsuelo y el aumento en la temperatura generado por la operación del electrodo de manera tal que no se llegue al valor máximo dispuesto ($\leq 100°C$).

Este criterio puede aplicarse de varias formas al diseño. En este caso se hace de forma indirecta asociando elementos de interés térmico como la resistividad eléctrica del terreno, la conductividad térmica y el alza de temperatura de diseño con el nivel de voltaje del electrodo. Puede usarse el cálculo realizado por Kimbark [18] en que, se limita el electrodo de acuerdo al valor de su potencial respecto a tierra remota con la expresión (2.1):

$$V_e = \sqrt{2\lambda\rho\Theta_e}$$

El método realiza varias suposiciones que llevan a error, como asumir la atmósfera como aislador de calor [6], que el calor generado es independiente de la forma o que las resistividades eléctrica y térmica son uniformes. Mas como parámetro de diseño base, sirve como un punto de partida para el dimensionamiento del electrodo.

El alza de la temperatura puede estimarse mediante la función descrita en [14]:

$$\Theta = \frac{(\mathrm{I}\cdot \mathrm{R_e})^2}{2\lambda_\mathrm{m}\cdot \rho_\mathrm{d}^2/\rho_\mathrm{m}}\left(1-\mathrm{e}^{-\mathrm{k}\cdot\frac{\mathrm{t}}{\mathrm{T}}}\right) \tag{3.8}$$

Donde, Θ es el alza de la temperatura en el suelo, I la corriente inyectada al electrodo, R_e la resistencia de puesta a tierra del electrodo, λ_m la conductividad térmica del suelo, ρ_d la resistividad equivalente, ρ_m la resistividad en la capa en que el electrodo está enterrado, k factor de coincidencia asociado al terreno, t tiempo de corriente inyectada circulando por el electrodo y T la constante térmica de tiempo.

3.2.7. Materiales de electrodos

El material seleccionado para el electrodo dice relación con su función. En el caso monopolar/homopolar, las diferencias entre ánodo y cátodo están bien definidas, mientras que en el caso bipolar según la polaridad de la línea ambos electrodos podrían llegar a operar en cualquiera de los roles.

La diferencia entre el comportamiento de ánodo y cátodo es que el primero recibe los efectos de la corrosión electrolítica, mermando así el material. En [30] se mencionan materiales empleados comúnmente como conductores según su función:

- Ánodo: Carbón/grafito, magnetita, aleaciones de acero silicoso y aleaciones de titanio recubierto.
- Cátodo: Carbón/grafito, y cobre.

Como las propiedades del ánodo resultan ser más críticas, se hará una revisión de los materiales conductores en base a [[18],[30]].

3.2.7.1. Conductor

Si se asume que el electrodo es ánodo durante la mayor parte del tiempo, el problema consiste en encontrar un material de bajo costo que no sufra de excesiva corrosión electrolítica.

- Acero: es un material económico, mecánicamente fuerte, fácil de manipular y soldar. Sin embargo, no tiene una gran capacidad de conducción para corrientes elevadas (1000[A] o más) y tiene un elevado índice de corrosión del orden de 9 toneladas al año para un funcionamiento con 1000[A].
- Acero silicoso: presenta características mejores que el hierro en cuanto a corrosión, sobretodo en combinación con otros elementos como molibdeno y cromo. Sin embargo, es sensible a los shocks térmicos y mecánicos, y no es tan estable químicamente con algunos componentes del suelo, su nivel de corrosión es del orden de entre 0.5 y 1 [ton] por cada 1[kA] al año.
- Grafito: presenta interesantes características eléctricas, un bajo nivel de corrosión y es poco reactivo. Su baja resistencia mecánica puede resultar un problema, mas sus propiedades lo hacen bastante apropiado para electrodos marinos.
- Magnetita: es un material, por su conformación, anisotrópico por lo que sus propiedades dependerán de la forma que se le dé y del proceso de constitución del elemento. Tiene buenas propiedades conductivas, pero poca resistencia a shocks térmicos.
- Aleaciones de titanio recubierto: Si bien no destaca por sus características eléctricas se destaca por las ventajas en su construcción que le otorga flexibilidad y resistencia mecánica y su estabilidad química. Tiene el mayor costo, pero está casi libre de corrosión, lo que le otorga una larga vida útil.

3.2.7.2. Material de relleno

Para reducir la corrosión en el material conductor, así como para otros efectos tales como la reducción de la temperatura y efectos de electroosmosis, se sugiere usar un

material de relleno, usualmente coque. La explicación de este fenómeno radica en las propiedades del coque que aísla al conductor del medio, y la diferencia en los tipos de conductividad: entre el conductor y el coque es electrónica mientras que con la tierra usualmente es electrolítica.

En un electrodo así construido, el material de relleno se vuelve el verdadero electrodo, y el rol del conductor es distribuir la corriente. Hay algunas pérdidas de coque, pero se pierde menos que, por ejemplo, acero, y su costo por masa es muy reducido en relación a todos los conductores mencionados previamente.

En el caso particular del electrodo marino y en algunos de costa se suele utilizar una capa de concreto para proteger el electrodo.

3.2.8. Configuración de electrodos

De acuerdo a las características propias de cada proyecto, puede variar la geometría y la distribución de los elementos de los electrodos [[18],[28]].

A continuación se presentan las configuraciones más típicas de electrodos según su tipo.

3.2.8.1. Electrodos terrestres

En general, se considerarán dos grandes familias de electrodos según su geometría:

3.2.8.1.1. Arreglos horizontales

Se emplean cuando se dispone de áreas extensas de características similares en todas las direcciones y/o se tiene una capa superficial de resistividad eléctrica aceptable. Geometrías típicas para esta configuración son: un anillo o en estrella, o bien simplemente conductores (barras) horizontales.

Acorde a lo mencionado en [18], el electrodo anillo es el que entrega la corriente de manera más uniforme al terreno, pero es inflexible en cuanto a su distribución en el terreno y su ventaja es adquirida en terrenos extensos con resistividad uniforme. Por otro lado se tienen la línea recta y las estrellas, estas se caracterizan por poseer concentraciones de densidad de corriente en las puntas lo que genera un mayor estrés térmico e irregularidad en el funcionamiento, sin embargo, pueden utilizar de mejor manera el espacio por su flexibilidad.

Una consideración especial es el número de alimentadores que posee el electrodo, en el anillo y en la línea puede variar, y al incrementar el número de alimentadores distribuidos se tiene una carga más uniforme en los electrodos. Por otro lado, las estrellas y las estrellas con ramificaciones se suelen alimentar desde su centro distribuyendo desde ahí a los conductores internos.

El método de construcción de estos electrodos consiste en: cavar una trinchera, llenar con coque, bajo el supuesto de que se utiliza coque como cuerpo del electrodo, hasta la mitad de la profundidad deseada, acostar el conductor y llenar con la otra mitad de coque. En cada etapa el coque y el relleno (tierra) a utilizar, debe ser compactado.

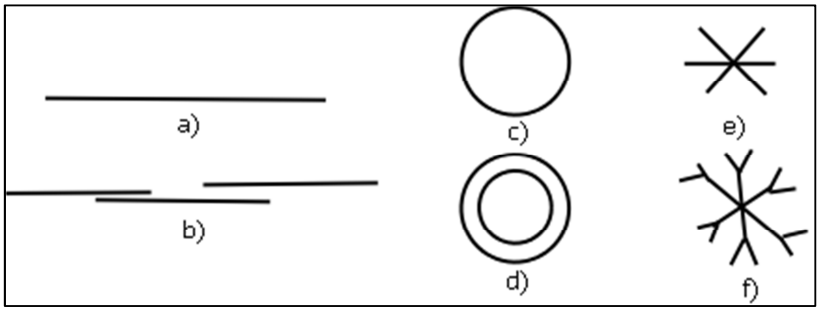

Figura 3.9: Formas usuales de electrodos a) Línea b) Varias líneas c) Anillo d) Doble anillo e) Estrella f) Estrella ramificada.

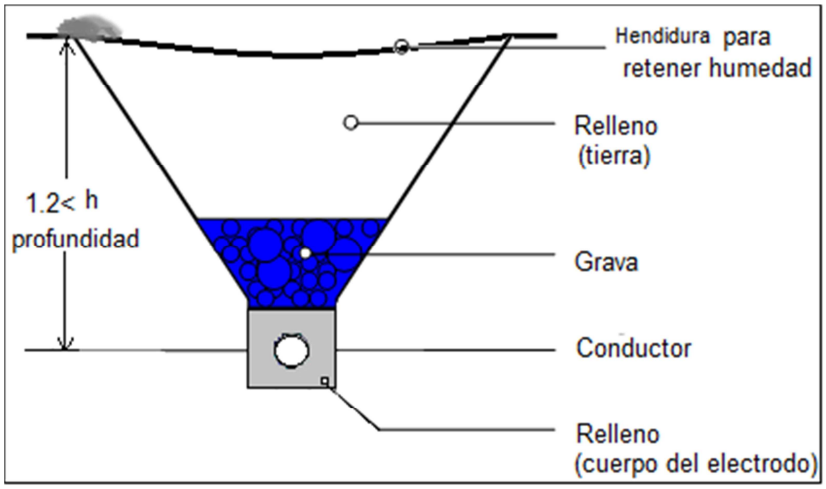

Figura 3.10: Corte transversal a electrodo terrestre superficial típico.

3.2.8.1.2. Arreglos verticales

Este tipo de arreglo es recomendable cuando en el estrato superior existe una resistividad mayor que en la profundidad del mismo. Estos electrodos presentan un menor impacto en cuanto a espacio en la superficie y tienen voltajes de paso menores.

Los electrodos verticales presentan problemas de ventilación producto de los gases generados por el proceso de electrolisis [8]. La presión de estos gases incide cambiando la resistencia del electrodo.

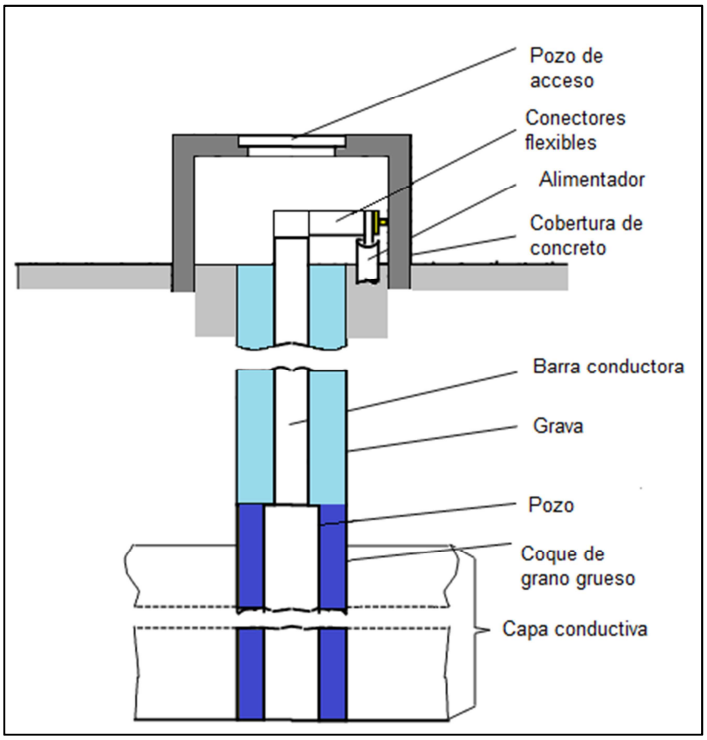

Figura 3.11: Corte transversal a electrodo de pozo. Basado en Apollo (Cahora Bassa) según datos de [29].

3.2.8.2. Electrodos marinos

De acuerdo a [6] existen tres tipos constructivos para esta variedad de electrodos según su función sea de ánodo, cátodo o reversible.

En el caso de electrodos de características anódicas y reversibles, si bien, debe distinguirse el diseño por su carga de trabajo, la constitución es básicamente la misma para ambos casos. Se emplean conductores internos de coque/grafito y más recientemente de aleación de titanio [10] y protección mecánica dada por tubos de polietileno y/o arena, arcilla, rocas o concreto sobre el lecho marino como se muestra en la Figura 3.12. Por otra parte, los electrodos catódicos son, sin excepción, de cobre. En cuanto a su constitución el material debe estar contemplado para minimizar los efectos electroquímicos del agua y su protección tolerar las solicitaciones mecánicas que son consecuencia de su ubicación.

En cuanto a su forma, los electrodos tipo ánodo presentados por los lineamientos presentados por Cigré [6] son lineales con curvas en los extremos, los reversibles de libre elección entre las formas presentadas para electrodos terrestres y los catódicos forma de anillo o lineal.

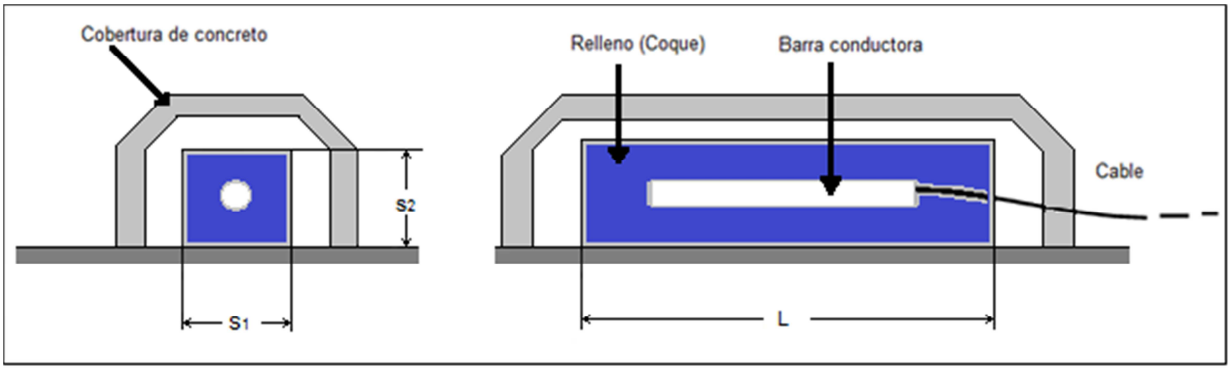

Figura 3.12: Ejemplo de composición de electrodo anódico marino.

3.2.8.3. Electrodos de costa

Estos electrodos tienen la subdivisión en: electrodos de playa, en contacto directo con el terreno o agua submarina, pero no directamente expuesto al agua salada; y los electrodos de estanque, en exposición directa al agua, pero protegidos de los efectos del oleaje y las mareas por medio de infraestructura, por ejemplo, rompeolas.

Los materiales para el electrodo de playa son los mismos que para el electrodo terrestre, salvo por el acero debido a que es necesario mantener la interfaz coque-acero seca. Su configuración debe ser lineal para ajustarse al espacio de la costa, en paralelo al borde costero.

En el caso del electrodo de estanque, los materiales utilizados en diseños existentes son: aleaciones de titanio, magnetita o grafito. La configuración, al requerir una superficie menor a otros tipos de electrodos, es de libre elección entre las configuraciones previamente vistas.

3.2.9. Establecer un diseño definitivo

De acuerdo a las características establecidas previamente se define un criterio de diseño a seguir, es decir, se definen: materiales y configuración del electrodo, y se introducen valores límite para criterios que garanticen seguridad para seres vivos e infraestructura y mantener una operación confiable durante la vida útil del proyecto. Todo esto bajo los parámetros establecidos dados por la operación estimada (corrientes y tiempos de operación) y características del suelo.

Como se presenta en el trabajo de Vallejos [32], el dimensionamiento del electrodo no es un procedimiento establecido y se lleva a cabo por prueba y error. Una vez establecido el criterio de diseño debe probarse el cumplimiento de este a través de los estudios descritos en 3.1.2.2, y de sobrepasar los límites establecidos, reevaluarse variando los parámetros de diseño como se ve en la Figura 3.13.

Por supuesto, este proceso es más complejo e involucra criterios económicos para intentar, como en la mayoría de los proyectos, dar cumplimiento a las restricciones al menor costo posible.

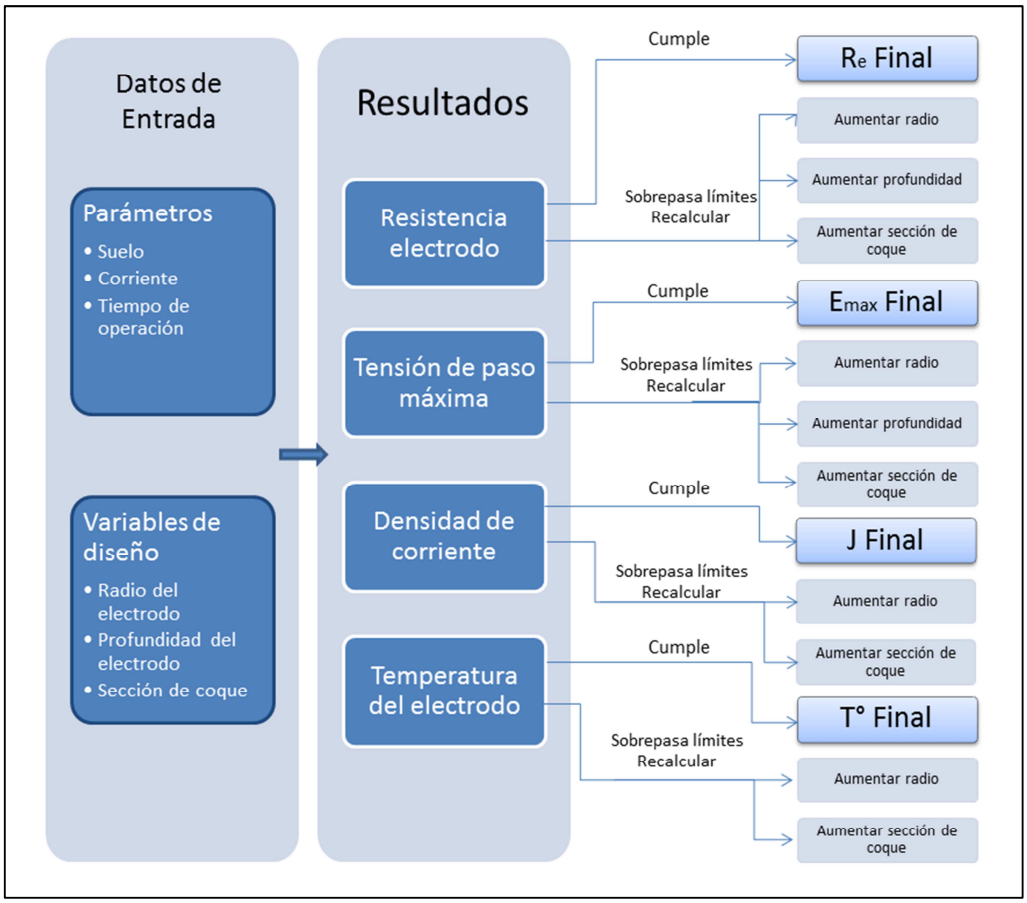

Figura 3.13: Criterio de dimensionamiento para el electrodo. Fuente: [31].

3.3. Consideraciones especiales

Una discusión sobre los efectos de las corrientes terrestres en el medioambiente y otras preocupaciones relativas al uso de electrodos es provista en un paper por Faugstad [10]. Los principales problemas expuestos son:

- Interferencia con sistemas eléctricos
- Corrosión
- Campos magnéticos
- Electrolisis

Debido a estos y otros elementos a tener en cuenta, la experiencia internacional dice que se ha vuelto difícil obtener permisos para la instalación de electrodo, particularmente aquellos con operación monopolar, pero se ha extendido también la

restricción a operación bipolar, inclusive en algunos casos se han planificado sistemas sin respaldo. Esto no es por efectos dañinos probados, sino que para evitar incertezas y retrasos en la aprobación del proyecto con todos sus costos asociados.

3.3.1. Interferencia con sistemas eléctricos

Como se ha mencionado previamente, los factores principales en la creación de un campo eléctrico son la corriente transmitida por el electrodo y la resistividad de las capas terrestres y el agua en su área de influencia. La corriente emitida por el ánodo puede entonces entrar por el neutro aterrizado de un transformador, conduciendo a una magnetización del núcleo la cual, al superponerse con la magnetización AC simétrica, dejan un flujo variable desbalanceado.

El efecto varía según el tipo del transformador, mas un criterio rápido para determinar si se requiere un dispositivo limitador de corriente u otra mitigación está dada por el uso de la siguiente tabla:

Tabla 3.5: Regulación según nivel de GPR.

GPR [V]	Necesidad de regulación
GPR<1	Mitigación no requerida
1<GPR<10	Mitigación probablemente no requerida
10<GPR<30	Mitigación posiblemente requerida
30<GPR<100	Mitigación requerida

Datos: [6]

Otra forma de interferencia ocurre debido a la inducción en transformadores de medida: al fluir una corriente adicional, estos entregan medidas erróneas pudiendo dispararse relés de protección u otros dispositivos de control de funcionamiento crítico para algunas aplicaciones, por ejemplo, en el circuito de una línea férrea [8].

3.3.1.1. Medidas de mitigación

Para el caso descrito de la corriente circulante a través de los transformadores de potencia, en [34] se proponen algunas alternativas para su mitigación:

- Inyección de corriente continua de polaridad inversa, con el fin de reducir o eliminar las corrientes entrantes por el neutro se puede inyectar una corriente en oposición, este método es costoso y exige el monitoreo continuo de la operación.
- Limitadores de corriente, la introducción de resistencias serie permite reducir las corrientes, pero causa una diferencia de potencial entre el neutro y la tierra además de convertirse en una conexión no efectiva a tierra.

- La instalación de un condensador serie con un *by pass* para la corriente y un *switch*, mediante este sistema se consigue limitar los efectos transientes sin sacrificar la operación segura del neutro.

Estos sistemas incorporan costos y pueden traer complicaciones en algunos eventos, por lo tanto, la solución óptima es el sitio del electrodo en una ubicación tal que los transformadores no se vean afectados por la operación.

En el caso de otros dispositivos que sea necesario proteger como generadores o instrumentos de medida, debe considerarse el uso de filtros y la consideración de las variaciones provocadas por la operación del electrodo para ajustar su funcionamiento.

3.3.2. Corrosión electrolítica

Como se ha indicado en secciones previas de este documento, al transmitirse la corriente a través de tierra, se establece un campo entre los dos electrodos cuya magnitud es dependiente de la resistividad del medio.

Las estructuras e instalaciones metálicas que pueden existir bajo tierra pueden verse sometidas a gradientes importantes causados por el campo eléctrico de la corriente transmitida por el electrodo. El campo eléctrico induce corrientes parásitas sobre la estructura causando corrosión en los lugares en que estas dejan el metal, este punto actúa como ánodo, por lo que sufre de los mismos efectos que el electrodo empleado en función anódica. Esto se aprecia en la siguiente figura:

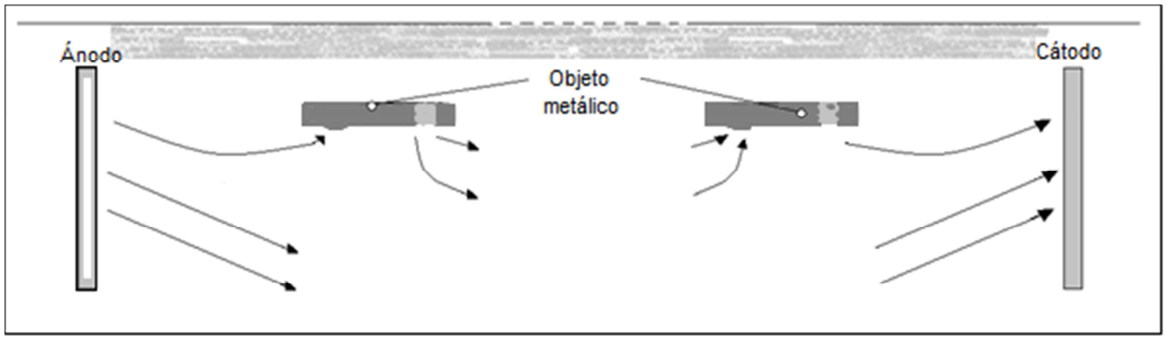

Figura 3.14: Corrosión de estructuras metálicas ante electrodos.

Una reacción típica [15] que se da entre una estructura metálica anódica y el suelo, favorecida por la electrolisis, se puede mostrar mediante la relación genérica de la forma:

$$\mathrm{Me}^{z+} + \mathrm{ze} \leftrightarrow \mathrm{Me} \tag{3.9}$$

Donde Me es el material metálico, e electrones y z un número entero.

Como se aprecia en la reacción, la corriente circulante favorece la formación de iones metálicos que se separan de los electrodos y se combinan con elementos presentes en el electrolito (terreno). Usualmente los cátodos no se ven afectados pues en ellos ocurre una reacción redox que genera una capa protectora de hidrógeno.

Los efectos de la corrosión en el deterioro de las instalaciones están directamente relacionados con el material, su tamaño, la fuerza y la disposición del campo. Como lo indica la referencia [6] tanto objetos aislados como no-aislados podrían verse afectados por estos efectos, en particular al no estar protegidos, los objetos no aislados sufrirán la corrosión superpuesta de las corrientes telúricas naturales y los efectos del electrodo, aunque estos serán despreciables desde una distancia entre 66 y 110[km].

Ejemplos de objetos no aislados son cables con capas conductoras, armaduras de acero o plomo. Otros ejemplos son tuberías de suministro de agua, estanques enterrados u otros materiales. Dependiendo de la orientación de los objetos metálicos, su longitud y la fuerza del campo, la corriente se recogerá en la parte más cercana al ánodo y se descargará en la zona más cercana al cátodo.

3.3.2.1. Medidas de mitigación

El efecto de la corrosión electrolítica es acumulativo, por lo tanto, debe tenerse en consideración la operación del electrodo para la evaluación de la mejor alternativa. En [15], se presentan diversas alternativas en detalle, entre las que se cuentan los ánodos de sacrificio, las uniones aislantes y las protecciones catódicas. Asimismo, puede requerirse que en ciertos elementos de seguridad (p.ej.: mallas de puesta a tierra de otros sistemas) se realice un monitoreo y reemplazo de la infraestructura.

Las medidas de mitigación más comunes son:

Una primera medida de mitigación es la cobertura de las estructuras afectadas con revestimientos que estabilicen la reactividad en el medio, por ejemplo: cemento, esmalte, algunos metales y revestimientos orgánicos.

Los ánodos de sacrificio son una alternativa válida y técnicamente simple, consistente en la aplicación de material sobre la estructura tal que actúe como ánodo y reciba los efectos de la corrosión librando a la estructura misma de estos.

La protección catódica consiste en proteger la estructura manteniéndola a un potencial negativo. Esto se realiza de forma forzada, por medio de fuentes de corriente DC o usando ánodos galvánicos cuya negatividad sea mayor a la del material protegido.

3.3.3. Efectos de campos magnéticos

Este no es un problema asociado el electrodo en sí mismo, sino que es un problema generalmente asociado a los cables submarinos y a las líneas que alimentan al electrodo.

Cualquier efecto para el caso magnético DC sólo es perceptible desde una distancia reducida. Como referencia, el campo magnético producido por una corriente de 1000[A] a través de un cable es aproximadamente equivalente al campo natural de la tierra a una distancia de 12 [m]. La desviación de brújulas es posible, pero es solo aplicable en electrodos superficiales y bahías. Asimismo, el otro efecto conocido del campo magnético es afectar a especies sensibles tales como: bacterias, gastrópodos, crustáceos, insectos, anfibios, tortugas marinas, aves y algunas ballenas.

3.3.4. Productos de la electrolisis

En la superficie del ánodo cuando las corrientes dejan al electrodo, toma lugar una reacción de oxidación electroquímica, formando oxígeno y cloro. El cloro es inestable en agua de mar, y reacciona con las moléculas de agua formando acido hipocloroso, y en reacciones secundarias, hipoclorito, cloruro, hipobromito y bromuro. Entre estos compuestos, el cloruro y bromuro son componentes naturales del agua marina y se consideran inofensivos. Sin embargo, el hipoclorito y el hipobromito llevan a la formación de cloroformo y bromoformo los cuales son tóxicos, pese a que este último también es un subproducto de la alimentación de las algas, por lo que su concentración no es crítica y puede ser similar a niveles naturales [10].

La formación de cloro se ve favorecida por:

- Aguas de bajas temperaturas.
- Alta salinidad
- Bajo pH
- Alta densidad de corriente

Otra situación en que pueden existir problemas de electrolisis es en el caso de electrodos profundos, en estos las reacciones producto de la corrosión sumados a la presión existente pueden generar problemas en la estructura alterando sus propiedades.

3.3.4.1. Medidas de mitigación

En el caso de los electrodos expuestos al mar, las medidas básicamente consisten en evitar las condiciones que favorecen la formación de cloro, por ejemplo: manteniendo un intercambio de agua de mar y evitando la acumulación de sales, incrementando el tamaño del electrodo para reducir la densidad de corriente y la utilización de materiales estables que no permitan las reacciones antes descritas.

Para el caso de electrodos profundos, es necesario garantizar la correcta ventilación de estos para que no exista acumulación de gases.

3.4. Testeo y monitoreo

3.4.1. Pruebas

Se deben realizar varias pruebas para constatar que los resultados de estudios de etapas anteriores sean fidedignos mediante metodologías más confiables.

3.4.1.1. Resistividad

La caracterización de la resistividad del terreno se realiza en etapas previas del diseño, sin embargo, al tener el terreno a disposición y la ubicación definitiva para los electrodos puede emplearse un método de aplicación directa de corriente.

El uso de inyecciones de corriente [23] es un método definitivo para establecer la distribución del potencial eléctrico entre los electrodos. La metodología de este sistema comprende el uso de una unidad generadora DC de más de 100[A] y una línea de transmisión dedicada o electrodos cableados entre sí. Como recomendación se puede emplear como electrodo “piloto” una de las secciones del electrodo final definitivo, inyectarle corriente y hacer las mediciones correspondientes.

Un resultado adicional de esta prueba, es que aplicando una inyección de corriente con polaridad secuenciada se puede identificar la corriente inducida sobre estructuras y distinguir la influencia del electrodo de otras fuentes de interferencia, pudiendo establecerse un perfil de terreno definitivo.

Se recomienda para la aplicación de este método que la separación entre los electrodos de prueba sea al menos comparable a la de la instalación permanente, para esto se puede utilizar la línea en operación monopolar, al estar la línea aislada de tierra se puede medir el potencial entre electrodos y se conoce la corriente transmitida. Sin embargo, esto puede ser difícil por los costos asociados (personal y equipos dedicados) y puede permitirse proceder con tramos más cortos, por ejemplo, utilizando el pie de una estructura metálica como tierra remota, midiendo el potencial y aplicando Ley de Ohm [8].

Las mediciones realizadas permitirán actualizar los modelos efectuados en los estudios previos, entregando estimaciones de los efectos electromagnéticos que el electrodo generará en los alrededores de su sitio.

3.4.1.2. Potenciales de paso y toque

Para la medición del potencial de paso, la prueba consiste en situar electrodos de medida a un metro entre ellos, debe realizarse en dirección radial en varios puntos de la superficie del electrodo instalado. Las medidas para la tensión de toque son similares,

se establece la diferencia de potencial existente entre un electrodo en contacto directo con la estructura metálica sobre la que se está induciendo corriente y el suelo.

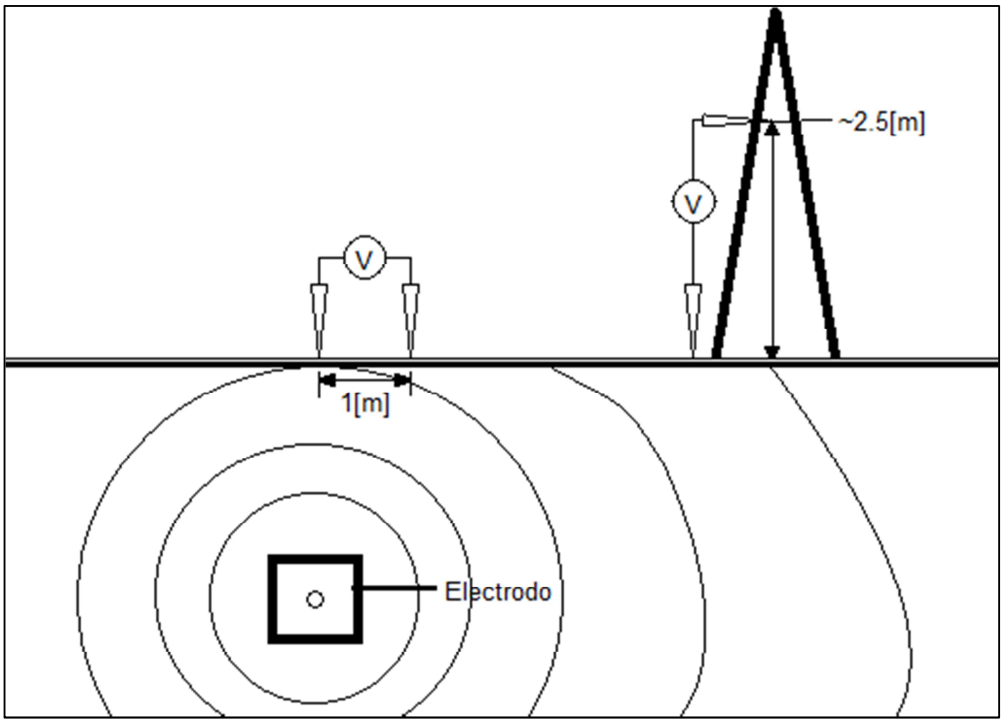

Figura 3.15: Ejemplo de mediciones para tensión de paso y toque. Corte transversal del terreno.

En función de contribuir a la mitigación de estos potenciales, si existen valores sobre el límite impuesto por diseño, existen medidas para reducir estas tensiones, por ejemplo: Para el potencial de paso, la compactación del suelo y/o la aplicación de una capa superficial de alta resistividad como parte del relleno (gravilla o concreto por ejemplo) pueden reducir la tensión en la superficie.

3.4.1.3. Calentamiento

El monitoreo del calentamiento del entorno cercano del electrodo debe ser continuo, pues para establecer el comportamiento de la temperatura, medidas esporádicas no podrían capturar los efectos estacionales que pueden hacer variar este factor. El uso de termistores para este fin es lo más usual [8].

3.4.1.4. Interferencias

La posibilidad de interferencia sobre otras estructuras puede ser observada mediante la captura del gradiente de campo en la dirección radial del electrodo. Con esto se obtienen líneas de campo generalizadas cuyas magnitudes dan a conocer las estructuras sobre las cuales podría ocurrir este fenómeno.

Para ilustrar el área de influencia en que existe interferencia se puede utilizar un diagrama de curvas equipotenciales como el de la figura:

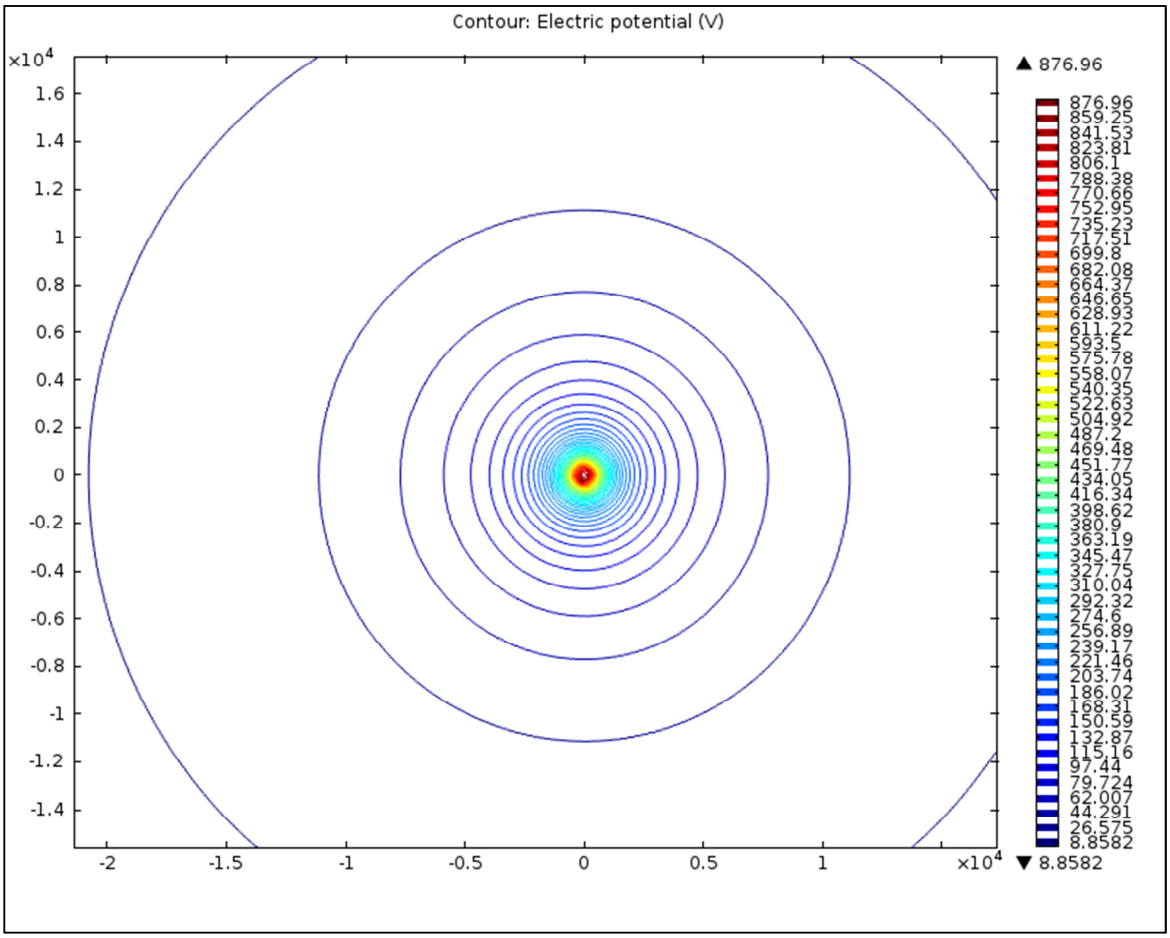

Figura 3.16: Curvas equipotenciales de un problema genérico.

La figura muestra el potencial simulado para un electrodo tipo anillo en un terreno homogéneo, lo cual explica que las curvas equipotenciales sean perfectos círculos concéntricos. En un caso real se considerarán irregularidades para dar una mejor aproximación del terreno, pero a la vez se supone que el campo no se ve distorsionado por la estructura metálica. Este resulta ser un caso cercano a la realidad para un terreno de baja resistividad y un caso pesimista en el caso de alta resistividad, por lo que resulta un buen criterio de aproximación [4].

3.4.2. Pruebas de comisionamiento

De acuerdo a lo presentado en [25], luego de la construcción de los electrodos las pruebas a realizar se dividen en tres categorías:

3.4.2.1. Pruebas de cumplimiento en la construcción

En esta categoría se busca documentar la correcta instalación de los electrodos en concordancia a lo indicado en las especificaciones y planos de proyecto.

Usualmente estas pruebas son realizadas por la/las empresas contratistas encargadas de la ejecución, pruebas típicas son la continuidad eléctrica en los componentes de cada electrodo, pruebas de aislamiento para los cables enterrados y la demostración de conducción de niveles elevados de corriente continua.

3.4.2.2. Pruebas de verificación de diseño

Estas pruebas buscan probar el cumplimiento de los requisitos establecidos en el criterio de diseño, en particular los concernientes al electrodo mismo. Por ejemplo, la resistividad individual de cada sección del electrodo o la resistividad respecto a tierra remota.

3.4.2.3. Pruebas de corrientes parásitas

Estas pruebas se aplican en presencia de los posibles afectados por problemas de interferencia y tienen por objetivo la identificación de:

1. Necesidad de medidas de mitigación y/o
2. Verificación del funcionamiento de medidas ya existentes.

4. Modelación del Problema de Distribución de Potencial y Campo Eléctrico para Análisis de Elementos Finitos

En el presente capítulo se introduce el problema de distribución de potencial, se realiza la representación del modelo en software paso a paso y su posterior validación empleando casos documentados en la bibliografía revisada.

4.1. Modelamiento

La simulación numérica del proceso de transmisión de corriente a través de tierra se llevará a cabo utilizando el software COMSOL Multiphysics versión 4.2a. Empleando este software se desarrolla la geometría, la caracterización de los dominios, el análisis y el post-procesamiento de los resultados.

Para el modelamiento se considera la operación en estado estacionario del sistema en operación monopolar. De esta forma se caracteriza una operación continua, y se simplifica el modelamiento usando un esquema estacionario.

Los parámetros de entrada del sistema al modelo son:

- Inyección de corriente al electrodo
- Geometría del electrodo
- Resistividad del terreno

Para la elaboración de los modelos de prueba se considera un terreno cilíndrico plano e isotrópico, separado en estratos horizontales de espesor uniforme. La forma del terreno tiene relación directa con el intento de reducir las diferencias entre distancias radiales entre los bordes y mantener la capacidad de separar en capas horizontales con control de la profundidad.

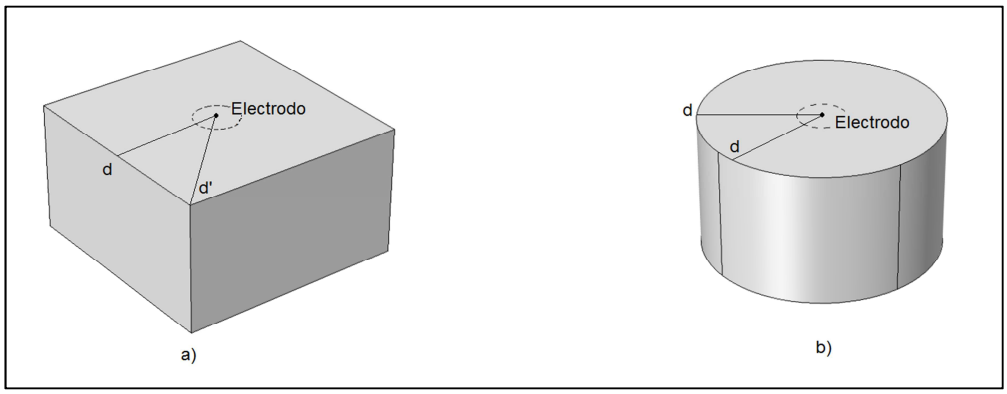

Figura 4.1: Modelos de suelo a) Paralelepípedo b) Cilíndrico.

En la Figura 4.1 se muestra la diferencia antes descrita, en el modelo a) la distancia entre los puntos d y d' no es igual, por lo que al aplicar condiciones de borde no se tendrá el mismo efecto a lo largo de cada corte superficial. El modelo b) hace que estas distancias sean iguales ofreciendo simetría en el modelo a la vez que permite controlar la profundidad de forma simple.

Una alternativa a estos modelos se presenta en [33], con un modelo semiesférico. Esta opción ofrece simetría completa, lo que sería deseable para una representación teórica más precisa, pero en este caso resulta poco práctica pues la experiencia indica que las capas inferiores de terreno no son utilizadas para la transmisión. Por ende, se estaría forzando el uso de capacidad de cómputo para una profundidad que no se utiliza, además de limitar el modelo a una distancia fija en todas sus direcciones.

Para la construcción del electrodo, debe considerarse que, aunque este no es precisamente un anillo, sino que en general se construye como una unión de tramos, se demuestra en [31], que el error asociado a esta suposición es mínimo. Con fines prácticos se supondrá que el electrodo tipo anillo distribuye la carga de forma perfectamente uniforme y que es un toroide de sección cuadrada, esto tiene el objetivo de explotar la simetría del problema, reduciendo la capacidad de computo requerida y el tiempo a utilizar.

Se realizaran 2 tipos de modelamiento: 2D axi-simétrico y 3D. En estos casos el acercamiento al problema es el mismo, una aproximación directa tal que pueda ser extrapolada directamente a un plano, podrán plantearse alternativas como el uso de una fuente lineal o puntual de corriente en casos particulares, mas la forma de abordar el problema es la misma.

Otras aproximaciones que no son profundizadas, pero se mencionan para difusión del conocimiento son:

La utilización de transformadas para modificar el alcance de la función de potencial. Como se muestra en la Figura 4.2, pueden existir dos volúmenes en el mismo modelo, el más cercano al origen puede estar determinado por la ecuación de Laplace, mientras que el volumen exterior puede estar definido por una ecuación convenientemente elegida que permita, sin modificar el enmallado, abarcar más distancia o inclusive realizar un mapeo del terreno hasta infinito.

Otro enfoque es el de utilizar un plano bidimensional que represente un volumen completo. El volumen se divide en bloques de tamaño uniforme, luego estos se reducen mediante la suposición de un modelo circuital a una única capa. Esto se representa en la Figura 4.3.

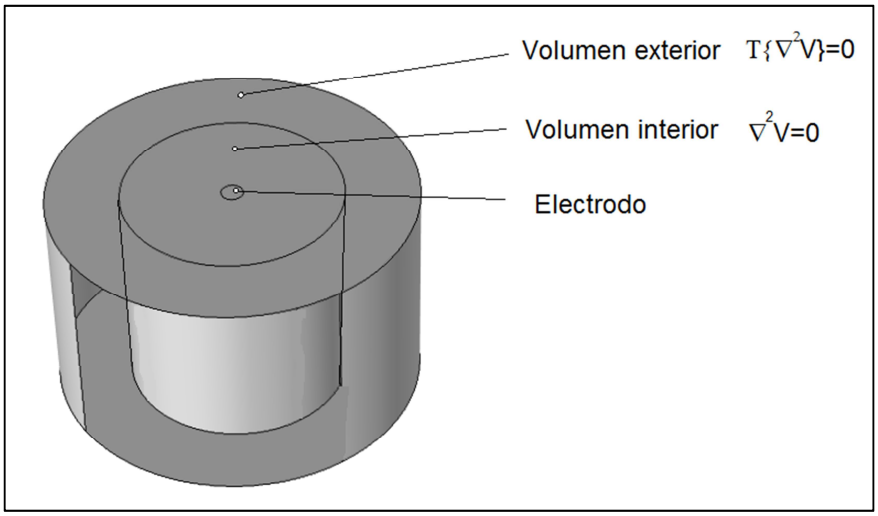

Figura 4.2: Planteamiento del problema mediante volúmenes diferenciados empleando una transformada.

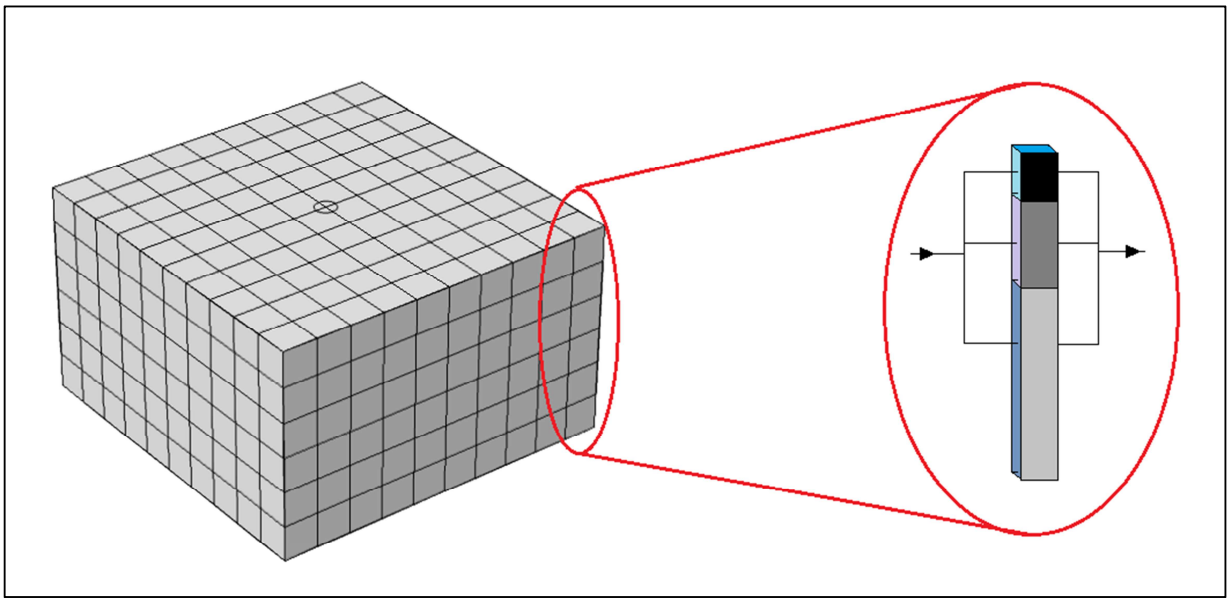

Figura 4.3: Planteamiento del problema mediante el equivalente circuital de un volumen en una superficie.

El detalle de la Figura 4.3 muestra una de las columnas del modelo de terreno, al dividir en bloques y encontrar un único bloque equivalente para cada columna se realiza la reducción a un volumen de una profundidad fija que puede ser vista por el programa de procesamiento como una superficie.

4.1.1. Modelado axi-simétrico

Considerando la idea del modelamiento general, resulta natural pensar en una simplificación, obteniendo la respuesta para un plano 2D y luego extrapolar este resultado al volumen.

Este sistema presenta como beneficio la simplicidad en el modelamiento, la reducción en los tiempos de computación de los resultados y la simplificación del enmallado. Como desventaja se limita a modelos simétricos y elementos como fallas verticales de terreno o irregularidades no pueden ser representados, lo que es un hecho relevante debido a que la característica del método de elementos finitos, que le distingue de otros métodos numéricos, es la capacidad de funcionar en dominios irregulares.

4.1.1.1. Geometría

Para el caso de estudio, la geometría bidimensional del problema se plantea empleando únicamente formas primitivas del programa.

Los estratos de terreno se modelan como rectángulos de ancho r_t y profundidades h_1 y h_2 respectivamente. El electrodo se representa como un cuadrado de sección $r_a = h_a$ a una distancia r_A del eje de rotación y a una profundidad h_e. La forma final de esto se puede apreciar en la Figura 4.4.

Este problema es simétrico respecto al eje vertical (z), por lo tanto, luego de resolver el problema se aplica una rotación al resultado para así obtener la perspectiva tridimensional.

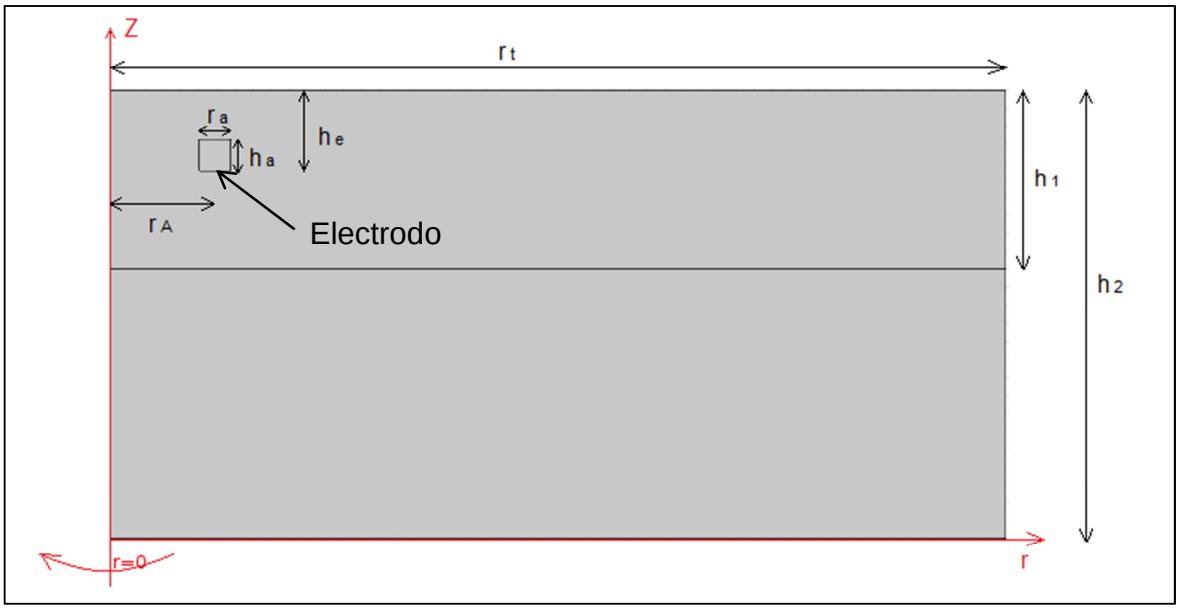

Figura 4.4: Geometría del problema axi-simétrico de dos capas.

4.1.1.3. Condiciones de borde

Las restricciones a aplicar al problema son las siguientes (ver Figura 4.5):

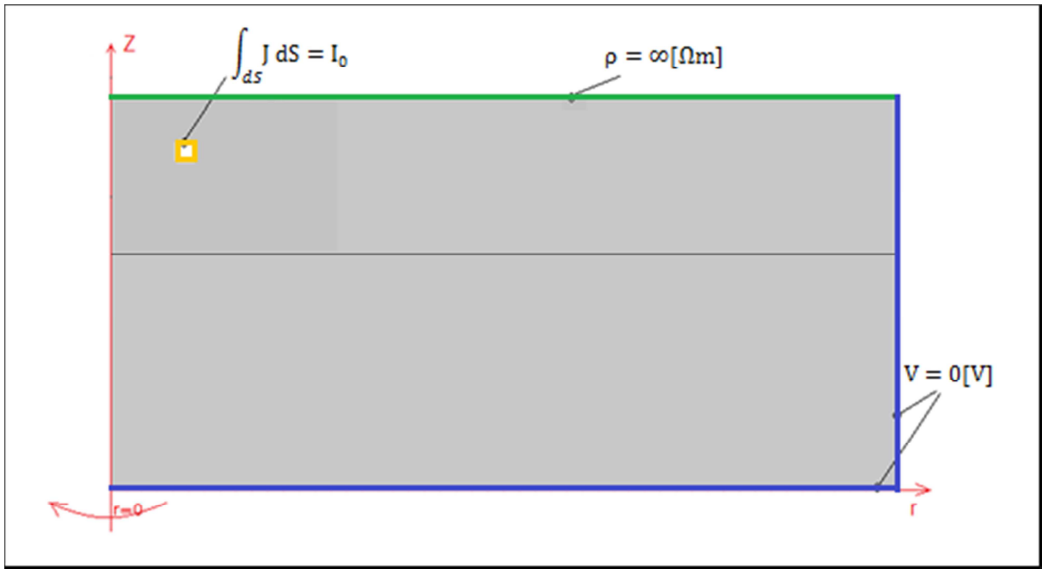

Figura 4.5: Condiciones de borde para el problema axi-simétrico.

- En los bordes externos, excepto en este caso el eje de simetría y el borde superior que representa la interfase aire-suelo, se aplica una condición de borde tipo Dirichlet. En la figura está marcado con los bordes azules (V=0[V]). Esta condición tiene por objetivo definir tierra remota, acotando el modelo. En condiciones ideales se encuentra lo más alejada posible del centro del electrodo.
- La interfase aire-suelo en cambio, señalada con un borde verde, presenta una condición tipo Neumann. El efecto generado por esta capa de resistividad mucho mayor al terreno es curvar los campos y dejarlos paralelos a esta superficie. Este efecto se puede ver en la Figura 4.6.

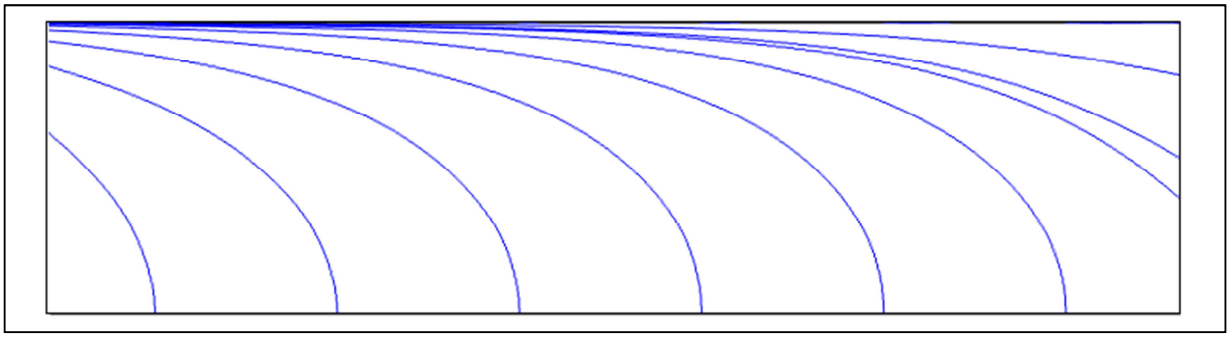

Figura 4.6: Ejemplo de esquema de líneas de flujo.

- El electrodo, caracterizado con un borde amarillo, tiene una condición de *Floating Potential* en que se aplica la corriente inyectada. Esta condición sitúa el potencial en un valor constante dependiente de la integral de la densidad de corriente normal al borde. Con esto se asume que toda la corriente inyectada se transmite electrónicamente, sin pérdidas, en la superficie del electrodo.

Otras restricciones son puestas de forma predeterminada por el software, estas son:

- Conservación de corriente, que es la función que da continuidad a la ecuación de potencial, e introduce la relación de la conductividad y permitividad con la corriente de desplazamiento.
- Aislación eléctrica, que elimina el paso de corriente por determinados bordes.
- Valores iniciales.
- Eje de simetría.

4.1.2. Modelado tridimensional

El modelo tridimensional consiste en la aplicación más directa del método. Se plantea el modelo simplificado del electrodo y el terreno considerando las interacciones provenientes de todas las direcciones.

Este tipo de modelamiento permite incluir todo tipo de perturbaciones y anormalidades al sistema, pudiendo desarrollarse modelos elaborados y cercanos a la realidad. Por otro lado, aumenta el número de grados de libertad asociados al problema, así aumenta también la memoria empleada y el tiempo de cálculo.

4.1.2.1. Geometría

Como se puede apreciar en la Figura 4.8, la geometría es análoga. La representación se hace empleando primitivas tridimensionales y una función booleana.

- Los estratos de terreno se representan por cilindros de altura igual a su espesor y radio correspondiente al radio de terreno a representar.
- El electrodo se forma mediante la operación diferencia entre cilindros concéntricos de altura $\mathrm{h_a}$ y radio $\left(\mathrm{r_A} + \frac{\mathrm{h_a}}{2}\right)$ y $\left(\mathrm{r_A} - \frac{\mathrm{h_a}}{2}\right)$, respectivamente, donde $\mathrm{h_a}$ es el lado de la sección de coque y $\mathrm{r_A}$ el radio del electrodo tipo anillo. Esto se describe mediante la siguiente figura:

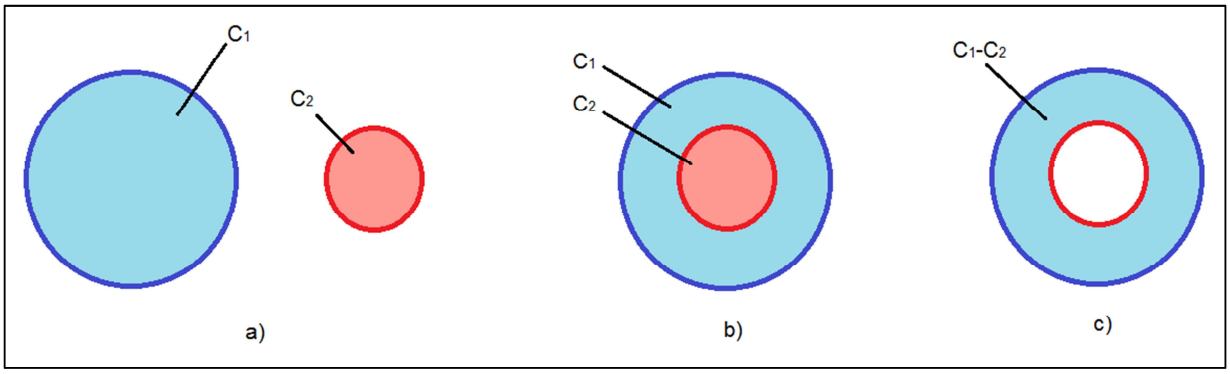

Figura 4.7: Ejemplo de operación diferencia entre objetos.

En la parte a) se muestran dos objetos, en este caso círculos, independientes entre sí. La parte b) los muestra concéntricos y la parte c) la aplicación de la función diferencia. Dándole profundidad a estos dibujos se tiene el método de elaboración para el electrodo anillo a desarrollar.

- Es destacable que el software inmediatamente reconoce el objeto ubicado dentro de otro de mayor volumen como un cuerpo independiente. Esto facilita que pueda ser trabajado como otro dominio, pudiendo caracterizarlo como un distinto material o pudiendo determinar un enmallado diferente.

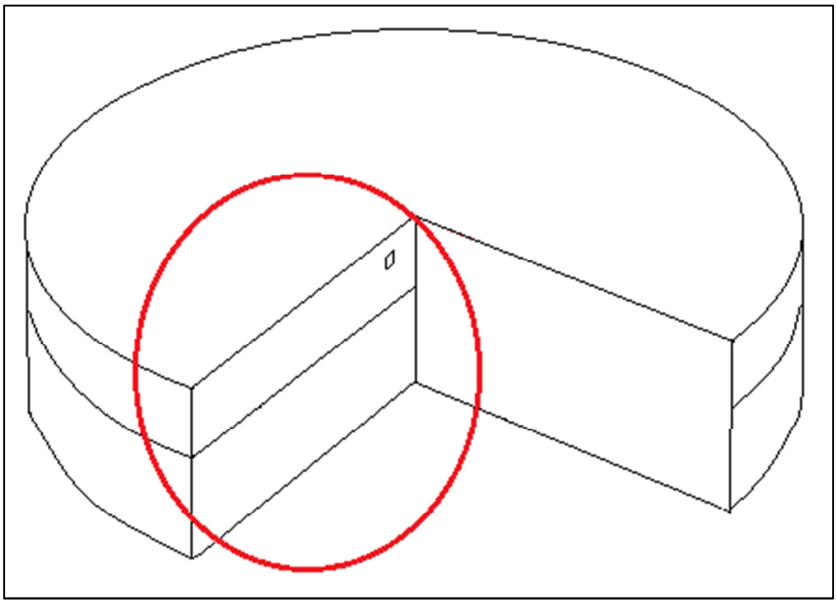

Figura 4.8: Geometría del problema tridimensional.

4.1.2.2. Condiciones de borde

La descripción de las condiciones de borde es totalmente análoga al caso axi-simétrico. Simplemente se ajusta para cubrir todos los bordes adicionales que aparecen en tres dimensiones.

Las condiciones son:

- Potencial V = 0[V] o tierra, en la base y los costados del terreno, presentados en rojo en la figura.
- Aislación eléctrica en la interfase tierra-aire, delimitado por el borde negro y el color verde semitrasparente.

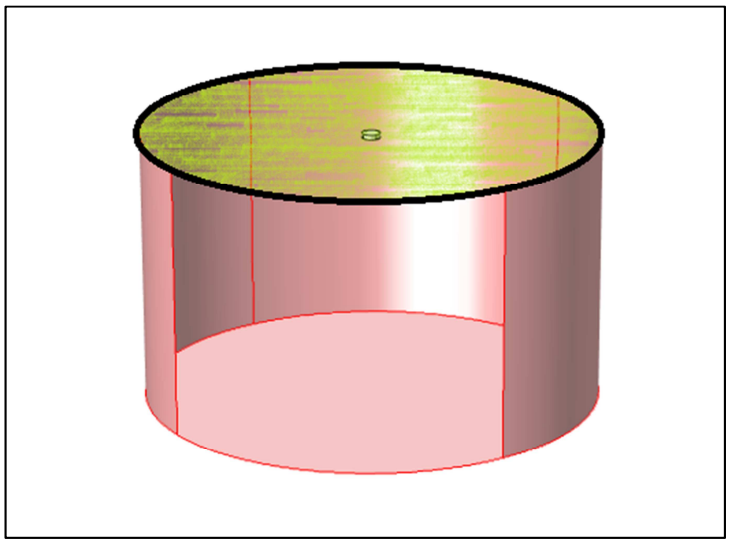

Figura 4.9: Condiciones de borde de terreno para modelo 3D.

- Electrodo a potencial flotante.
- Condiciones iniciales definidas por el programa.

4.2. Validación del modelo

Para verificar el buen comportamiento del modelo realizado en la sección previa, se contrastaran los resultados obtenidos en la publicación *Performance of HVDC Ground Electrode in Various Soil Structures* [26] y aquellos obtenidos en Dimensionamiento de Electrodos de Puesta a Tierra tipo Anillo para Sistemas de Transmisión HVDC [32] que provienen del mismo modelo simplificado.

Los factores a comparar para realizar la evaluación de los modelos efectuados en Comsol son:

- **GPR** (*Ground potential rise*): el máximo potencial que alcanza la puesta a tierra respecto a una tierra remota de referencia. Este voltaje es igual al producto entre la resistencia de puesta a tierra y la corriente a través de ésta. En el modelo realizado en Comsol este valor será obtenido como el valor máximo de potencial en el volumen del electrodo el cual, por construcción, es de distribución uniforme.

- **Resistencia del electrodo**: es la resistencia de puesta a tierra del electrodo, esta es dependiente de los parámetros del mismo y de la resistividad del terreno. Este valor no se obtiene directamente de COMSOL sino que es resultado del cociente entre el GPR y la corriente inyectada que se asume constante.
- **Densidad de corriente**: se comparará el valor de densidad de corriente máxima en el modelo. Para esto en el modelo se busca el valor máximo de la norma de la densidad.
- **Potencial de tierra**: corresponde al nivel de tensión más elevado en la superficie del terreno. Por construcción, en cualquier caso de terreno homogéneo el valor máximo estará distribuido a lo largo de los puntos más cercanos del electrodo. El valor del potencial de tierra se obtendrá en el modelo como el máximo valor de potencial en el plano superficial del terreno.
- **Potencial de paso**: el voltaje de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie a un metro de distancia. En el caso del electrodo anillo, la distancia de interés es radial pues en este sentido se darán las mayores variaciones, por ende, para obtener el máximo de este valor se busca el máximo campo eléctrico en dirección radial perteneciente al plano superficial.

El modelo realizado en estas publicaciones es un anillo de radio 517.6[m], con una sección de coque de 0.6 [m] por 0.6[m], enterrado a una profundidad de 1.524[m] y tiene una corriente inyectada de 1800[A].

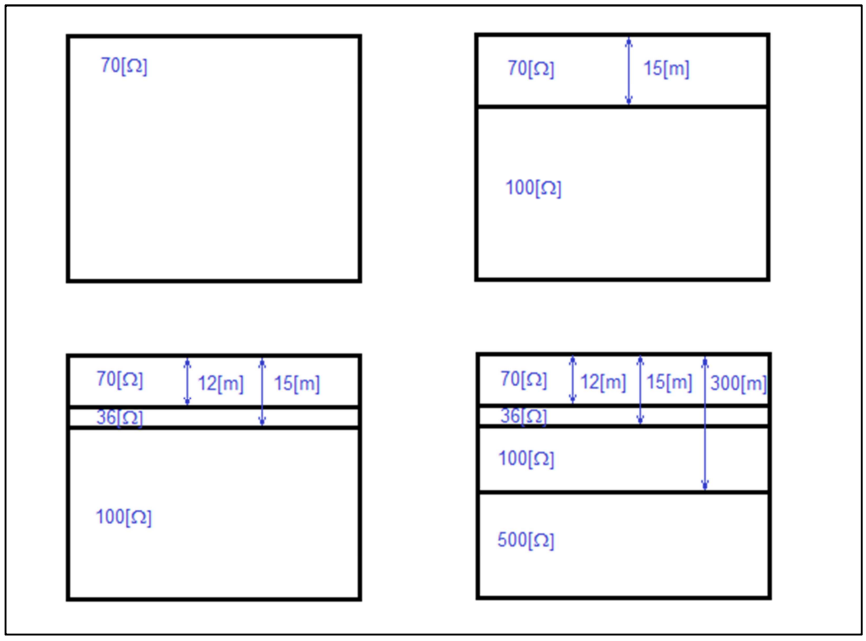

Figura 4.10: Modelos de terreno para validación.

Se tienen 4 modelos de terreno con distinto número de capas. Para comprobar la metodología desarrollada en COMSOL, se realizará para cada tipo de modelamiento, axi-simétrico y 3D, la simulación para los 4 modelos de terreno. Así se contrastarán los resultados entre distintas metodologías y grados de complejidad.

Como nota válida para el resto del modelo, los materiales a emplear se supondrán de permitividad eléctrica relativa 1 para tierra y 80 para agua de mar. Los materiales se caracterizan en este trabajo únicamente por su conductividad.

Los resultados obtenidos en dichas publicaciones se presentan en la Tabla 4.1. Las tres primeras columnas corresponden a lo presentado en [26], la primera columna corresponde al método analítico desarrollado en [18], la segunda corresponde al método de las imágenes presentado en [32] y las dos últimas están resueltas empleando el módulo de ingeniería del software especializado CDEGS que se caracteriza por emplear el método de elementos finitos [32]:

Tabla 4.1: Resultados obtenidos en [26] y [32]

Ítem	Método analítico	Método de las imágenes	FEM (CDEGS)	FEM (CDEGS)
Resistividad de capa [Ωm]				
Capa 1	70	70	70	70
Capa 2	-	100	36	36
Capa 3	-	-	100	100
Capa 4	-	-	-	500
Profundidad [m]				
Capa 1	∞	15	12	12
Capa 2	-	∞	15	15
Capa 3	-	-	∞	300
Capa 4	-	-	-	∞
Resultados				
GPR [V]	102	128.91	116	186
Resistencia electrodo [Ω]	0.057	0.072	0.064	0.104
Densidad de corriente [A/m^2]	0.228	0.231	0.233	0.233
Potencial de tierra [V]	-	-	112	183
Potencial de paso [V]	4.0	3.21	4.4	4.4

Como se puede observar, el análisis realizado tiene sus resultados enfocados principalmente en el plano local.

Para la obtención de los resultados con los modelos se emplearán los modelos tridimensional y axi-simétrico en un terreno de radio 10[km] y profundidad 1[km]. Si bien

estos valores son muy inferiores a los necesarios para realizar un cálculo ajustado a la realidad, si se considerarán suficientes para tener el orden de magnitud de las variables a comparar con los resultados a comparar. Además, por su menor tiempo de cómputo se adjunta un modelo con terreno de mayores dimensiones en el caso axi-simétrico. Un estudio más acabado de la influencia del terreno en los resultados esperables se realizará en el capítulo 5.

Tabla 4.2: Resultados obtenidos para el caso tridimensional.

Ítem	FEM Comsol 3D 1 Capa	FEM Comsol 3D 2 Capas	FEM Comsol 3D 3 Capas	FEM Comsol 3D 4 Capas
Resistividad de capas [Ωm]				
Capa 1	70	70	70	70
Capa 2	-	100	36	36
Capa 3	-	-	100	100
Capa 4	-	-	-	500
Profundidad [m]				
Capa 1	1000	15	12	12
Capa 2	-	1000	15	15
Capa 3	-	-	1000	300
Capa 4	-	-	-	1000
Resultados				
GPR [V]	84.206	105.28	80.17	172.93
Resistencia electrodo [Ω]	0.047	0.058	0.044	0.096
Densidad de corriente [A/m²]	0.463	0.695	0.522	0.503
Potencial de tierra [V]	82.101	102.64	78.16	168.61
Tensión de paso [V/m]	4.22	3.36	6.35	3.4

Como se aprecia, los valores entregados por el software no difieren significativamente de los valores hallados en la bibliografía.

Se pueden encontrar diferencias significativas entre los valores de GPR que pueden ser explicadas por las diferencias entre los terrenos. Para explicar este fenómeno se puede recurrir a métodos como el de reducción de estratos propuesto por Burgsdorf-Yakobs [[24], [31]]. La presencia de capas inferiores de terreno de mayor resistividad

convierten el problema equivalente en un problema de menor resistividad, esto implica que las distintas capas de terreno tienen inferencia en la resistencia total del electrodo, aunque ponderadas por su espesor y profundidad.

Utilizando el método de reducción de capas se llega a que los modelos de entre una y cuatro capas, representados por una única capa de resistividad equivalente quedan respectivamente en: 70[Ωm], 99.05[Ωm], 99.02[Ωm] y 170.75[Ωm].

Teniendo equivalentes de resistividad de terreno prácticamente iguales para los modelos de 2 y 3 capas, se espera mayor similitud entre estos, luego la reducción en el potencial del electrodo para el caso de 3 capas se puede ver como un caso excepcional que probablemente represente un error en la resolución.

A continuación, se presentan los resultados para el caso axi-simétrico para un sistema de las mismas dimensiones del caso tridimensional:

Tabla 4.3: Resultados obtenidos para el caso axi-simétrico (terreno 10[km] radio, 1[km] de profundidad).

Ítem	FEM Comsol 2D 1 Capa	FEM Comsol 2D 2 Capas	FEM Comsol 2D 3 Capas	FEM Comsol 2D 4 Capas
Resistividad de capas [Ωm]				
Capa 1	70	70	70	70
Capa 2	-	100	36	36
Capa 3	-	-	100	100
Capa 4	-	-	-	500
Profundidad [m]				
Capa 1	1000	15	12	12
Capa 2	-	1000	15	15
Capa 3	-	-	1000	300
Capa 4	-	-	-	1000
Resultados				
GPR [V]	74.225	125.53	123.2	198.81
Resistencia electrodo [Ω]	0.041	0.069	0.068	0.110
Densidad de corriente [A/m²]	0.072	0.195	0.206	0.207
Potencial de tierra [V]	68.658	116.12	113.96	193.84
Tensión de paso [V/m]	1.895	3.265	3.76	3.78

Finalmente, el desarrollo axi-simétrico para un terreno de mayor extensión, en la medida que se tienda a mayores valores se espera un comportamiento más similar a lo que expondría en condiciones reales.

Tabla 4.4: Resultados obtenidos para el caso axi-simétrico (terreno: radio 100[km] profundidad 20[km]).

Ítem	FEM Comsol 2D 1 Capa	FEM Comsol 2D 2 Capas	FEM Comsol 2D 3 Capas	FEM Comsol 2D 4 Capas
Resistividad de capas [Ωm]				
Capa 1	70	70	70	70
Capa 2	-	100	36	36
Capa 3	-	-	100	100
Capa 4	-	-	-	500
Profundidad [m]				
Capa 1	1000	15	12	12
Capa 2	-	∞	15	15
Capa 3	-	-	∞	300
Capa 4	-	-	-	∞
Resultados				
GPR [V]	93.39	126.22	123.68	199.3
Resistencia electrodo [Ω]	0.052	0.070	0.069	0.111
Densidad de corriente [A/m²]	0.423	0.232	0.226	0.226
Potencial de tierra [V]	89.65	121.5	118.9	194.5
Tensión de paso [V/m]	2.55	3.79	3.73	3.75

4.2.1. Validación del área de influencia

Esta validación se realizará acorde a lo presentado en [32]. Por las distancias a cubrir, este análisis se aplicará sólo al modelo axi-simétrico de terreno, cubriendo un terreno homogéneo de una única capa con radio 500[km], profundidad 100[km] y resistividad 350[Ωm].

Los datos del electrodo son: 380[m] de radio, profundidad 3[m]. Al no especificarse una sección de coque, se utilizará un electrodo lineal y una corriente inyectada de 3000[A].

Para el contraste se empleará una carga puntual, modelada como una esfera de magnitud despreciable pero tal que pueda aplicársele condición de borde correspondiente a la inyección de corriente.

Las figuras que muestran los resultados se muestran a continuación:

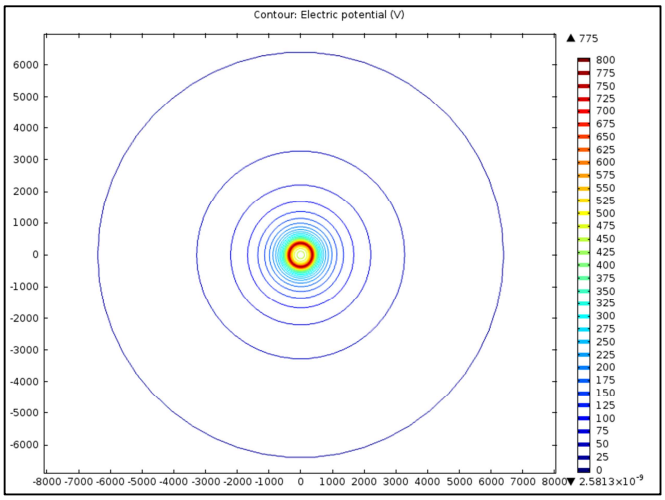

Figura 4.11: Curvas equipotenciales para el electrodo tipo anillo para estudio de área de influencia.

Como se puede apreciar en la figura, existe una fuerte concentración del potencial en la superficie sobre la ubicación del electrodo mismo, un nivel medio de potencial en el centro estable por simetría y hacia el exterior, se va reduciendo hasta llegar en este caso a 25[V] a un poco más de 6[km] de distancia, 1[V] a 81.66[km] y 0.1[V] a 199.35[km].

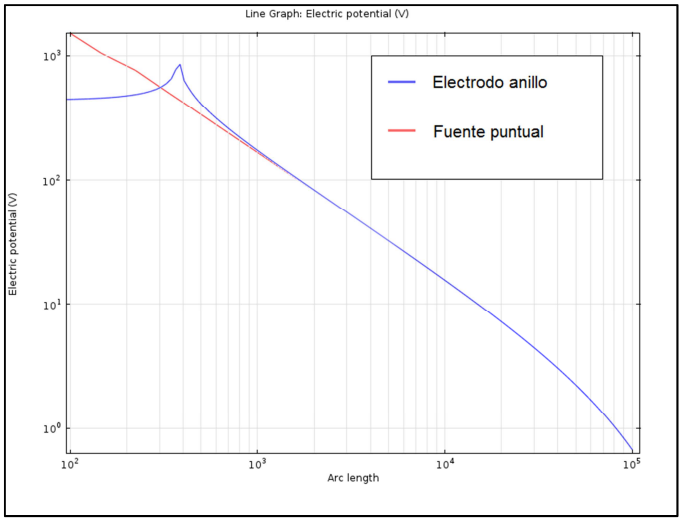

Figura 4.12: Gráfico potencial vs. Distancia radial para el electrodo tipo anillo y una carga esférica de tamaño reducido.

Como se puede observar en la Figura 4.12, al tender a infinito, las curvas de potencial al nivel de la superficie del terreno se acercan. Como se espera, la curva del electrodo anillo muestra un sobresalto importante entre los 300 y 700[m] aprox. correspondiente al paso sobre el anillo mismo. Luego de esto, a una distancia del centro del orden de un par de kilómetros, el error se va reduciendo hasta menos del 1%. Esto hace posible que, para un análisis en largas distancias, se pueda realizar el estudio empleando una carga puntual simplificando así la geometría del electrodo y minimizando la dificultad al modelar el problema.

El resultado obtenido puede ser útil como acercamiento a afirmar que el potencial y el campo generados por un electrodo cualquiera a grandes distancias es equivalente al de una carga puntual cuyos valores vienen dados por las expresiones:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi x} \tag{4.1}$$

$$E = \frac{\rho \cdot I}{2\pi x^2} \tag{4.2}$$

En estas expresiones, ρ es la resistividad del terreno, I la corriente inyectada en el electrodo y x la distancia.

Sin embargo, para realizar esta afirmación, es necesario considerar otros casos que no presentan simetrías respecto al eje vertical.

4.3. Discusión de resultados

En vista de los resultados obtenidos se puede afirmar que el análisis de elementos finitos desarrollado entrega valores muy cercanos a los provistos por la bibliografía. Además, se constata el efecto de la inclusión de capas de terreno al diseño, siendo este un factor gravitante en el voltaje de paso y superficial.

El caso más cuestionable es el de tres capas para el caso tridimensional, en este caso es muy posible que debido al gran número de grados de libertad del problema y la distribución de su malla no entregue el valor óptimo.

Lo esperable sería lo ocurrido en los modelos axi-simétricos, una pequeña reducción en la tensión frente al modelo de dos capas debido a que, al obtener una capa equivalente formada por las capas de 70[Ω] y 36[Ω] dan como resultado una capa de menor resistividad que la capa de 15[m] de 70[Ω] en el caso de reducir el terreno a una única capa equivalente.

En cuanto al comportamiento del campo es de acuerdo a lo esperado según lo propuesto por la teoría.

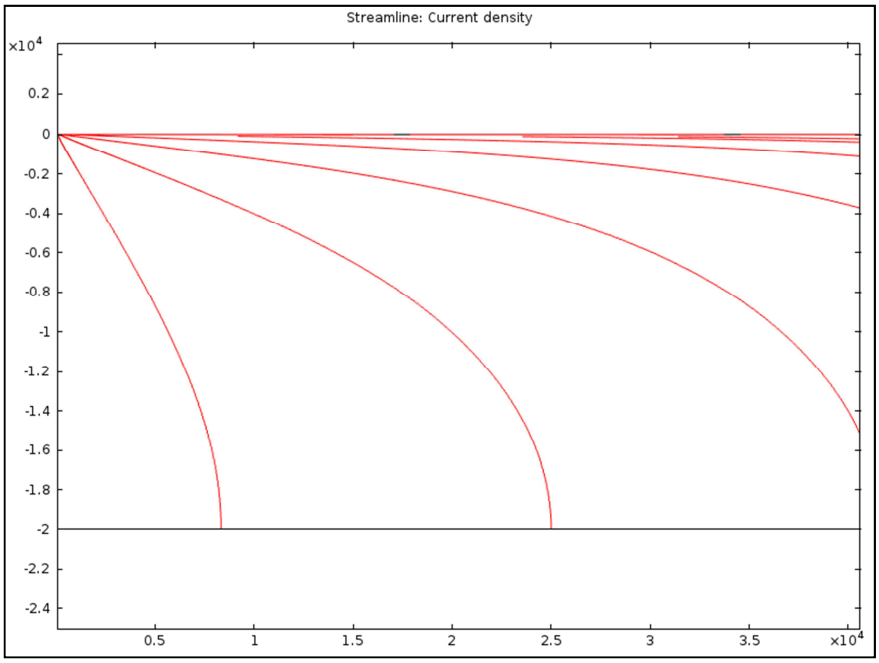

Figura 4.13: Líneas de campo eléctrico en el terreno.

La Figura 4.13 ejemplifica la tendencia válida para todos los casos revisados, las líneas de campo dispersándose en terreno de forma paralela a la superficie y hacia capas más profundas de terreno. Al ser en general las capas inferiores más resistivas las líneas tienden a mantenerse en las primeras capas.

4.3.1. Comparación de los modelos propuestos

Para realizar una comparación *ad-hoc* de los modelos propuestos, se realiza el modelamiento del caso axi-simétrico para la misma extensión de terreno utilizada en el caso tridimensional.

En todos los casos se aprecian diferencias entre los valores obtenidos, esto tiene relación con las interacciones del caso tridimensional que entregan valores ligeramente distintos para cada punto a una distancia R. Esto implica que la distribución no es perfectamente uniforme y habría que encontrar un valor promedio para obtener una mejor caracterización del electrodo, similar al comportamiento real según [13]. La Figura 4.14 muestra este fenómeno, producto del error tolerable existen valores mayores y menores para una misma distancia del centro, las diferencias en las tonalidades que describen circunferencia irregular muestran para un mismo radio, varios valores distintos en función del ángulo, lo que no es razonable para casos de las características de los estudiados cuyo comportamiento debe ser perfectamente regular.

El error se acrecienta debido al refinamiento de la malla, para el caso de validación más sencillo (terreno de 1 estrato), la variación del valor del GPR en el caso axi-

simétrico es de 56[V] a 93[V] al pasar de un enmallado normal a uno extremadamente fino según la denominación de COMSOL, es decir, del orden del 40%. En el caso tridimensional, para obtener resultados en un tiempo coherente, se reduce bastante el nivel de calidad de la malla, por lo que las distintas fuentes de error explican el comportamiento irregular de dicho caso de estudio.

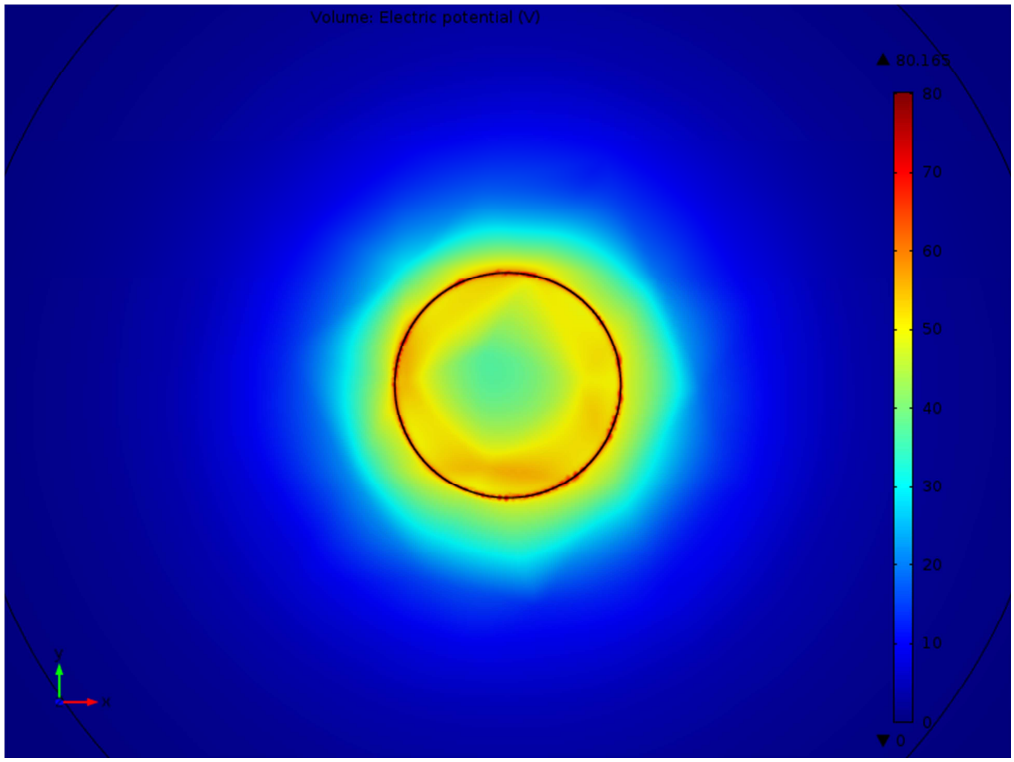

Figura 4.14: Detalle de potencial sobre el electrodo en modelo tridimensional.

4.3.2. Influencia de capas profundas en el modelo

Como último punto de comparación se profundiza un poco más en el comportamiento de la distribución para un distinto número de capas de terreno. Para tratar este punto se emplea el modelo más detallado entre los presentados en este capítulo, el modelo axi-simétrico de 100[km]x20[km].

Se muestra en la Figura 4.15 el potencial a nivel de la superficie entre el centro del terreno modelado y su extremo. Destaca de la figura que, tal y como se esperaba con el análisis inicial del modelo de suelo equivalente de una capa, los modelos de dos y tres capas son muy similares, de lo que se deduce que la capa de 3[m] para fines prácticos resulta despreciable. Otro elemento llamativo es que en el gráfico se aprecia una gran diferencia en el decaimiento del potencial, lo que evidencia el peso en el área de influencia del electrodo.

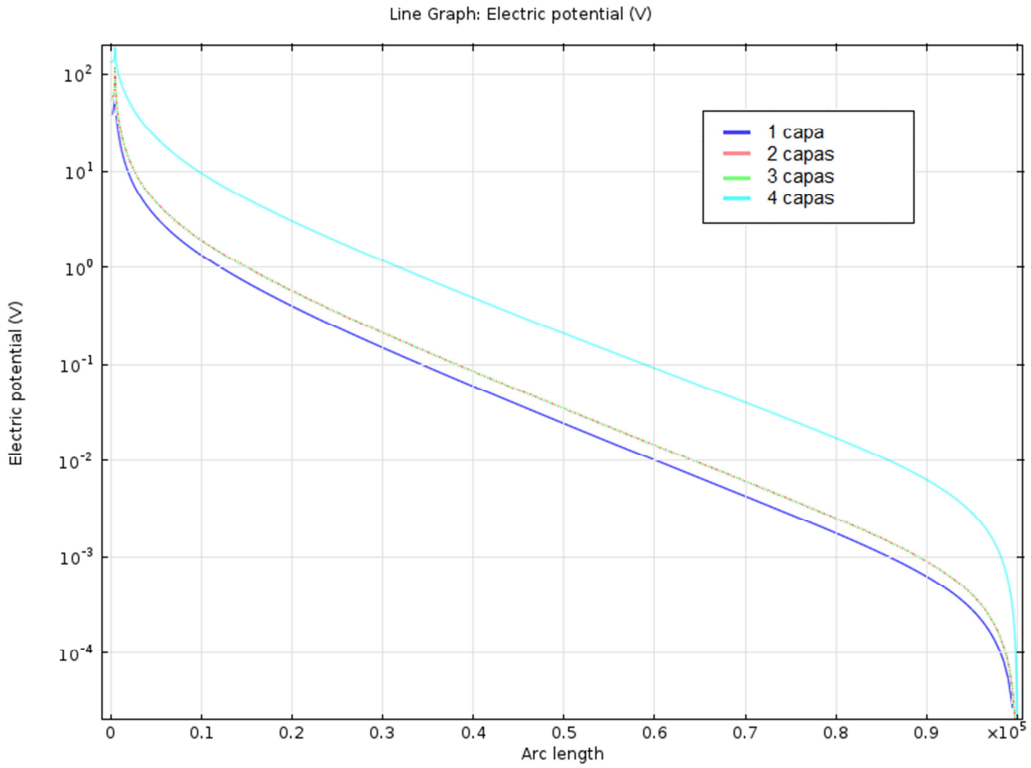

Figura 4.15: Comparación de la distribución de potencial 0-100[km], modelos de 1 a 4 capas.

5. Sensibilidad de Parámetros del Modelo

Este capítulo tiene por objetivo probar la sensibilidad de los parámetros al hacer simulaciones variando cada parámetro y variable en específico.

En primer lugar, se prueban los parámetros de modelamiento: profundidad y radio del terreno. Posteriormente, se pone a prueba la sensibilidad ante: profundidad de enterramiento del electrodo [33] y variaciones en la resistividad del terreno [33]. Finalmente, se realiza un análisis a las variables manipulables del electrodo anillo: radio y espesor de la capa de coque.

Con la realización de estos estudios se espera confirmar la validez del método en función de las variaciones esperables ante cada cambio. Por ende, los análisis se realizan sin un grado de alta precisión, lo relevante de esta sección es la tendencia seguida por los resultados y no estos como tal.

Como caso base, a menos que se especifique lo contrario, se considera un modelo de dos capas horizontales de 70 [Ωm] y 100[Ωm] respectivamente de un espesor 15[m] y 20[km] (infinito). El electrodo es tipo anillo de radio 500[m] con una sección de coque cuadrada de 0.6[m], está enterrado a una profundidad de 1.5[m]. La corriente inyectada es fija en 1800[A]. El modelamiento es axi-simétrico por comodidad, capacidad y por presentar en la validación los resultados más cercanos a los de la referencia bibliográfica.

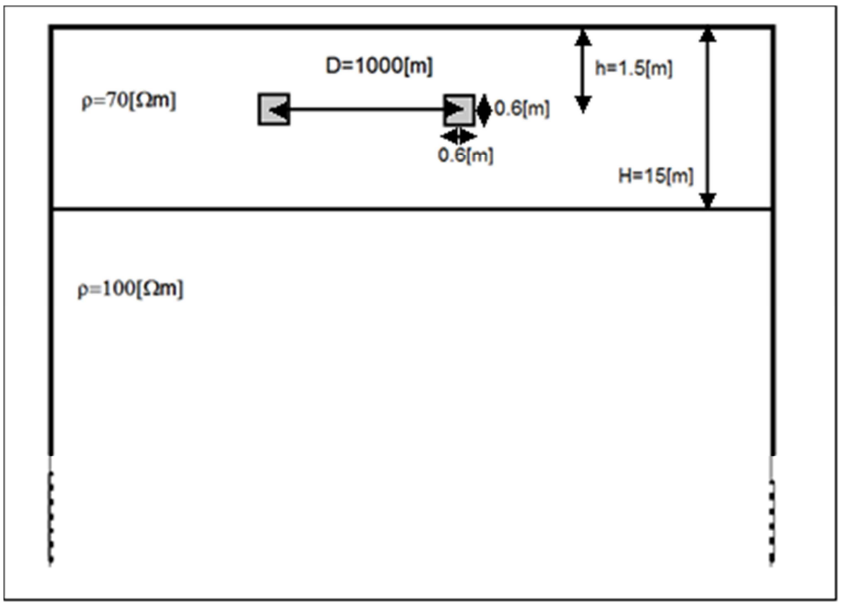

Figura 5.1: Esquema caso base.

5.1. Radio del terreno

El radio del terreno caracteriza el potencial de referencia V=0[V]. Por lo tanto, se espera que al aumentar el área modelada, el nivel de precisión aumente.

Los valores obtenidos son:

Tabla 5.1: Efectos de la variación del radio del terreno.

	Radio del terreno [km]				
Resultados	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**
GPR [V]	128.09	129.81	129.68	129.27	130.15
Resistencia electrodo [Ω]	0.071	0.072	0.072	0.072	0.072
Densidad de corriente [A/m²]	0.211	0.255	0.2061	0.190	0.2445
Potencial de tierra [V]	125	124.9	124.35	123.12	125.35
Tensión de paso [V/m]	3.565	3.96	3.457	3.31	4.215

Acorde a lo expuesto en la tabla, el resultado permanece prácticamente idéntico en todos los casos, salvo errores perfectamente asociados a la tolerancia del software. Esto implica que los valores para la vecindad del electrodo (~ 1[km]) no son sensibles al radio modelado, mas sí debe considerarse para determinar la zona de influencia del electrodo.

Naturalmente, si se quiere observar la zona de influencia de un electrodo y se utiliza una extensión de terreno inferior, la condición de borde 0[V] no permitirá constatar la distribución real en toda su extensión. Por ende debe modelarse una extensión de terreno tal que asegure mostrar los efectos de la inyección de corriente más allá de la zona de interés para que la restricción del modelo no influya limitando los valores más allá de cierto radio.

5.2. Profundidad del terreno

En este caso se revisará la influencia de la máxima profundidad del terreno. Al igual que el radio este determina la tierra de referencia, la circulación del campo y las corrientes de tierra por capas más profundas del subsuelo. Algunas referencias como [36] indican que para el caso local, que es el de principal interés por ser donde están los valores máximos, no tiene mayor relevancia. Sin embargo, la distancia debe ser considerada para casos en que los electrodos se encuentran muy alejados entre sí.

Los valores obtenidos para la simulación son:

Tabla 5.2: Efectos de la variación de la profundidad del terreno.

Resultados	Profundidad del terreno [km]				
	0.1	1	10	50	100
GPR [V]	68.479	111.91	128.28	129. 85	129.99
Resistencia electrodo [Ω]	0.038	0.062	0.071	0.072	0.072
Densidad de corriente [A/m²]	0.1897	0.1897	0.1897	0.1897	0.1897
Potencial de tierra [V]	62.37	105.75	122.15	123.7	123.8
Tensión de paso [V/m]	6.93	3.315	3.31	3.31	3.676

Como se puede apreciar de los datos, salvo por los casos de profundidades muy reducidas, la bibliografía es precisa en su estimación. Como criterio general, puede establecerse la validez de una razón radio/profundidad de terreno de 10:1 como mínimo para un buen desempeño, aunque se recomienda para mayor precisión que la razón sea del orden 3:1 con el fin de que la distancia entre el centro y distintos puntos del borde no tengan diferencias significativas en sus valores para potencial.

5.3. Efectos de la profundidad de enterramiento del electrodo

La Tabla 5.3 muestra los diferentes niveles de profundidad a los que se simula el funcionamiento del electrodo:

Tabla 5.3: Efectos de la variación de la profundidad del electrodo.

Ítem	Enterramiento [m]					
	1	1.5	2	3	4	5
Potencial electrodo [V]	132.5	129.2	128.1	125.6	123.8	122.5
Resistencia electrodo [Ω]	0.074	0.072	0.071	0.070	0.069	0.068
Densidad de corriente [A/m²]	0.235	0.189	0.226	0.217	0.234	0.206
Potencial de tierra [V]	129.1	123.1	122.4	113.9	113.1	109.9
Tensión de paso [V/m]	5.802	3.311	2.477	2.509	1.775	1.190

Como se puede apreciar y tal como se espera, la resistencia, el GPR y la tensión de paso se reducen en la medida que la profundidad de enterramiento es mayor, favoreciendo los aspectos de seguridad.

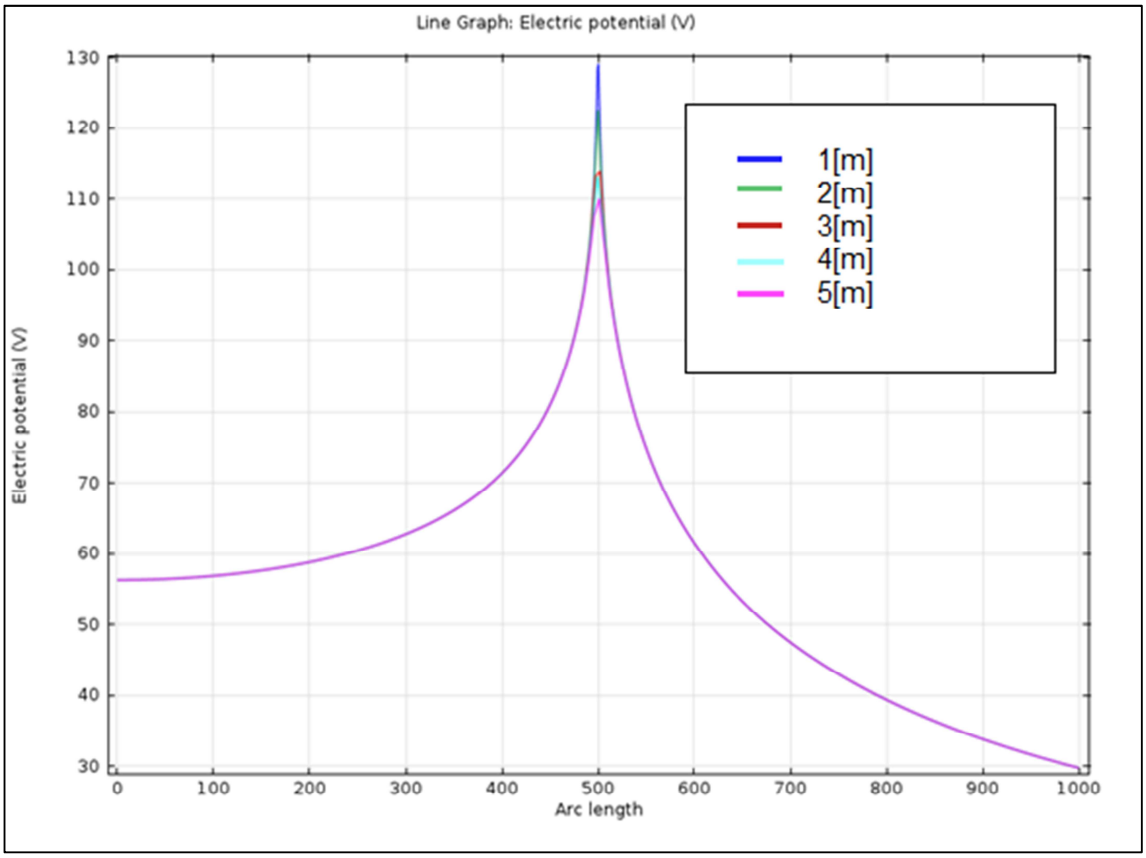

Figura 5.2: Distribución de potencial de superficie local en función de la profundidad de enterramiento del electrodo tipo anillo.

La Figura 5.2 muestra el resultado de la distribución de potencial a nivel de superficie para varias profundidades de enterramiento. Como se aprecia la influencia es apreciable sólo a nivel de superficie directa del electrodo y no lo es a medida que se toma distancia.

El electrodo va adquiriendo las características de un electrodo de profundidad, si bien en el caso de existir capas profundas de menor resistividad podría favorecerse la transmisión, tiene dificultades para disipar el calor y sufre por efecto de los gases producto de la electrolisis.

5.4. Efectos de la variación de corriente inyectada

La corriente inyectada en el electrodo es uno de los parámetros dependientes del sistema HVDC a ser aterrizado. Luego, va directamente relacionado con los límites del proyecto como tal y no es un elemento que pueda ser considerado variable.

Tabla 5.4: Efectos de la variación de la corriente inyectada al electrodo.

Resultados	Corriente [A]				
	1000	1800	2000	3000	4000
GPR [V]	71.814	129.2	143.63	215.44	287.26
Resistencia electrodo [Ω]	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
Densidad de corriente [A/m²]	0.105	0.189	0.211	0.316	0.422
Potencial de tierra [V]	68.398	123.1	136.80	205.19	273.59
Tensión de paso [V/m]	2.082	3.311	4.163	6.245	8.328

Los resultados siguen prácticamente de forma perfecta la tendencia esperada. De acuerdo al método analítico (ecuación 4.1), la tensión y sus valores asociados son linealmente dependientes de la corriente, por lo tanto, los valores obtenidos responden al comportamiento esperado.

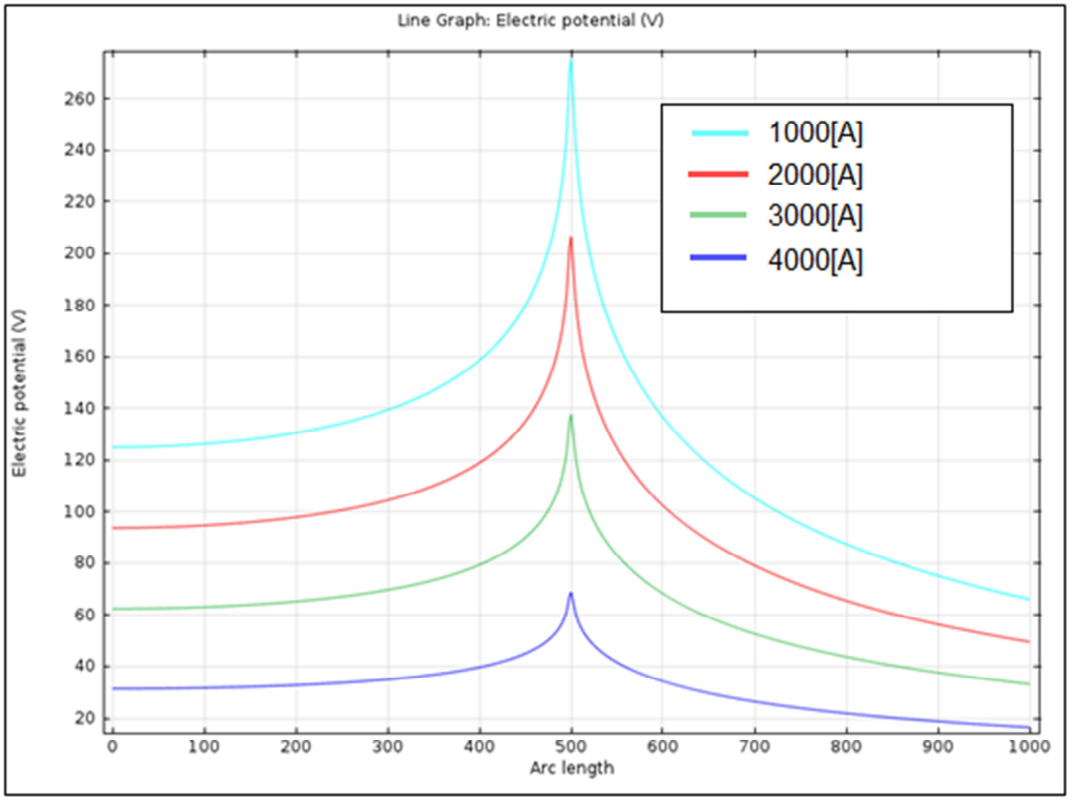

Figura 5.3: Distribución de potencial de superficie local en función de la corriente inyectada en el electrodo.

La Figura 5.3 muestra que en este caso el área de influencia se verá modificada.

5.5. Efectos de la variación de resistividad

A continuación, se presenta la sensibilidad a la resistividad de terreno. Para el modelamiento realizado de 2 capas, se espera que las mayores variaciones se den en el caso de la capa superior pues en este caso el electrodo permanece en dicha capa para todos los casos planteados.

Las siguientes figuras pretenden representar el comportamiento de la distribución de la corriente a través del terreno. Los parámetros son ρ_1 y ρ_2, 100[Ωm] y 1000[Ωm] según corresponda y la primera capa tiene un espesor de 80[m].

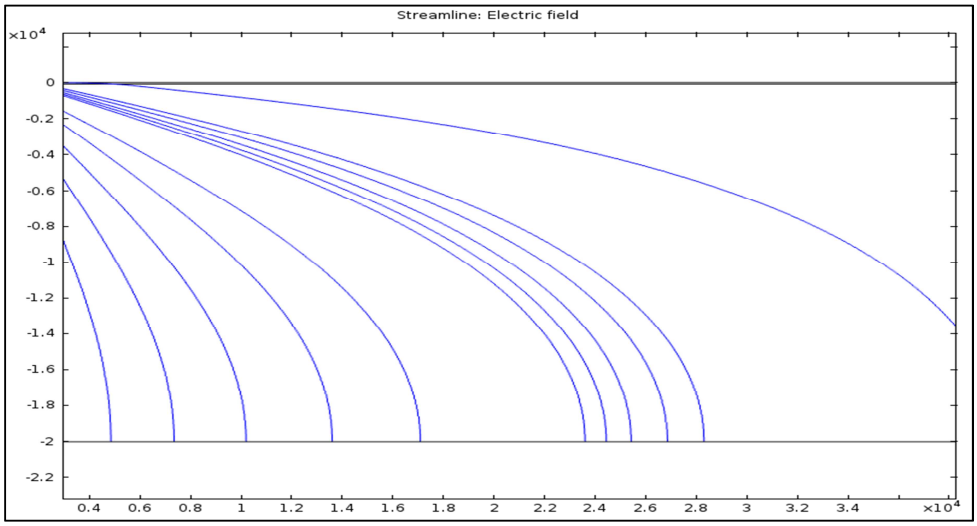

Figura 5.4: Distribución de líneas de densidad de corriente. Terreno $\rho_1 < \rho_2$.

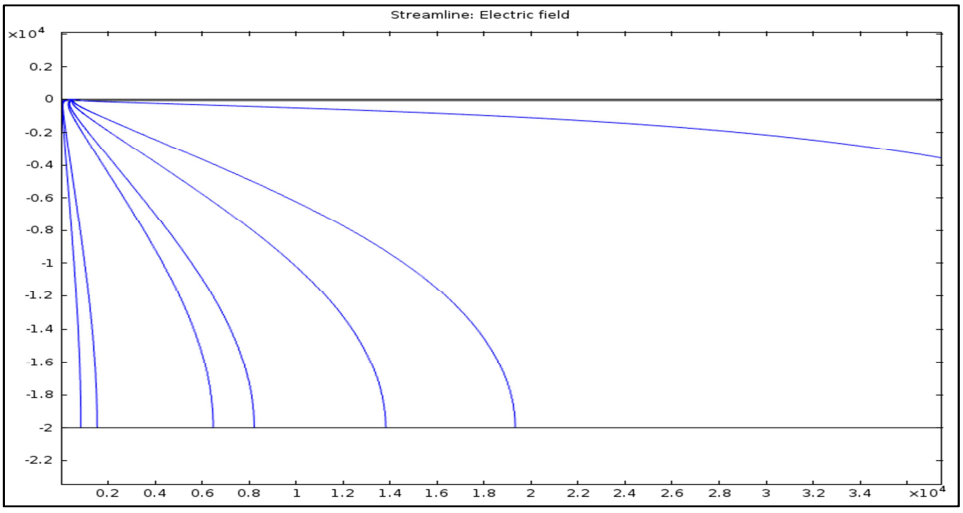

Figura 5.5: Distribución de líneas de densidad de corriente. Terreno $\rho_1 > \rho_2$.

Estas líneas muestran que en el caso en que $\rho_1 > \rho_2$, la corriente baja de forma más dispersa y se extiende todo lo posible cerca de la primera capa, mientras que en el caso contrario la corriente se transmite principalmente usando la capa inferior.

Hecha esta caracterización del comportamiento esperable según la resistividad en cada capa. A continuación se tratan los cambios en la resistividad de capas de forma independiente, es decir, primero se modifica únicamente la capa inferior de terreno manteniendo la superior en su valor original y viceversa.

De acuerdo a lo expuesto en [33], el aumento de la resistividad en la capa superior de terreno hace aumentar todos los parámetros medidos (en [33] esto corresponde a: GPR, resistencia, temperatura y voltaje de paso). Mientras la resistividad de la capa inferior provoca los mismos efectos, pero en una menor escala, es decir, la resistividad equivalente del terreno provoca efectos homogéneos en este, pero la capa superficial tiene un "peso" mayor para fines prácticos.

Tabla 5.5: Efectos de la variación de la resistividad en la capa inferior de terreno.

	Resistividad de la capa inferior de terreno [Ωm]			
Resultados	**1000**	**300**	**50**	**10**
GPR [V]	645.01	275.83	85.50	46.519
Resistencia electrodo [Ω]	0.358	0.153	0.048	0.026
Densidad de corriente [A/m²]	0.207	0.207	0.207	0.207
Potencial de tierra [V]	638.5	269.5	79.4	40.48
Tensión de paso [V/m]	3.048	3.254	3.31	3.30

En primer lugar, se muestra los efectos de las variaciones de resistividad en la capa inferior de terreno. De la Tabla 5.5 se aprecia que influye de forma significativa a nivel de la tensión en el electrodo mismo y la superficie del terreno, más no genera variaciones importantes en la tensión de paso al igual que en lo presentado en [33].

La Figura 5.6 muestra por otro lado que esta capa resistiva es de gran importancia en cuanto a su área de influencia como se menciona en [36].

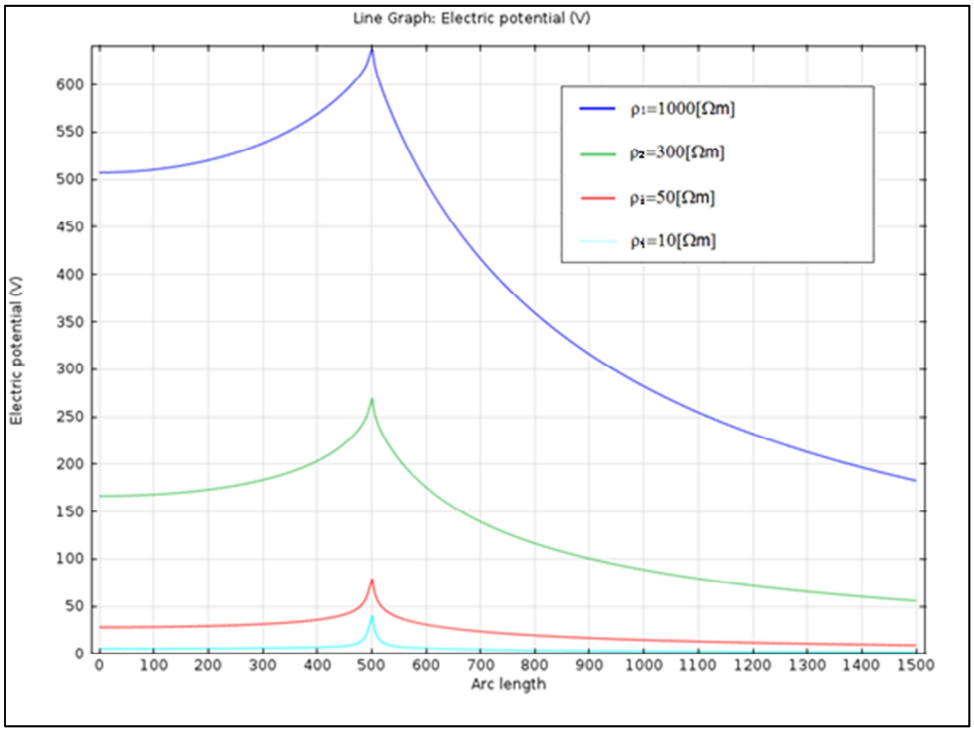

Figura 5.6: Distribución de potencial de superficie local en función de la resistividad de la capa inferior de terreno.

Los resultados para la variación en la capa superior de terreno se muestran a continuación:

Tabla 5.6: Efectos de la variación de la resistividad en la capa superior de terreno.

Resultados	Resistividad de la capa superior de terreno [Ωm]			
	1000	300	50	10
GPR [V]	619.9	257.26	115.42	72.027
Resistencia electrodo [Ω]	0.344	0.143	0.064	0.040
Densidad de corriente [A/m²]	0.191	0.191	0.190	0.193
Potencial de tierra [V]	533.5	231.3	111.0	71.1
Tensión de paso [V/m]	47.1	14.17	2.36	0.447

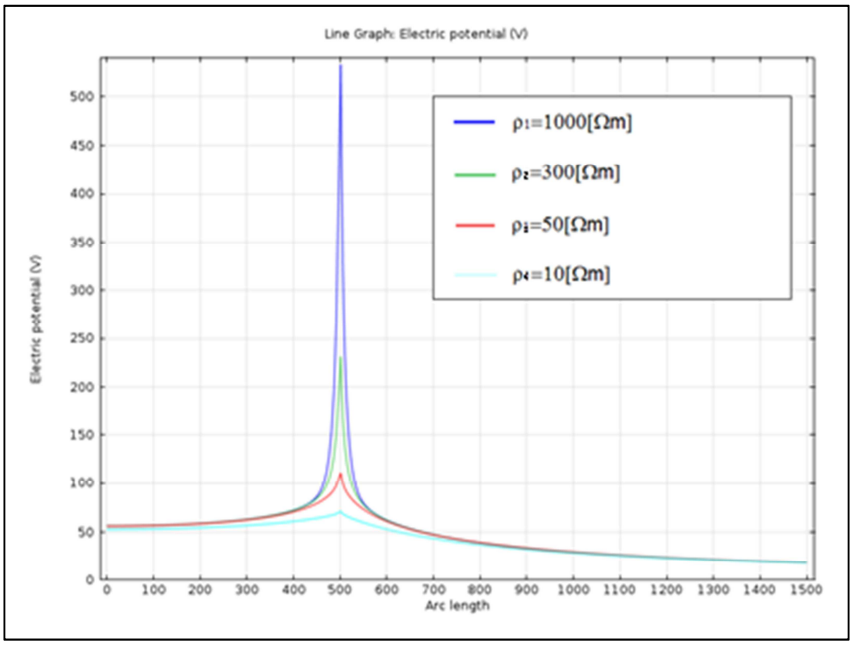

Figura 5.7: Distribución de potencial de superficie local en función de la resistividad de la capa superior de terreno.

La tabla en este caso muestra grandes diferencias tanto en el potencial como en la tensión de paso. Por otro lado, la figura indica que este valor sólo influye de forma local, sin tener mayor relevancia en la transmisión subterránea. Esto se ve acentuado por el poco espesor de la primera capa del modelo.

En [33], se destaca como conclusión que la capa superior influye de forma más significativa en el desempeño del electrodo. Pese a esto, en los casos presentados en esta sección la variación mayor de potencial se da al alterar la capa inferior, esto puede tener varias causas: la diferencia entre la resistividad del caso base para ambas capas, la poca relevancia relativa de la primera capa por su espesor, entre otros.

5.6. Variación en el radio del anillo

El radio del anillo es, según [32], la variable de diseño más influyente en los resultados. Sin embargo, el sentido común nos dice que no es práctico ni económicamente factible realizar un electrodo excesivamente grande, y por lo tanto, es una medida de mejora en el comportamiento que debe cotejarse con otras alternativas tales como, por ejemplo, aumentar la sección de coque.

Los resultados del estudio de sensibilidad resultan ser:

Tabla 5.7: Efectos de la variación del radio del electrodo anillo.

Resultados	Radio del anillo [m] 300	400	500	600
GPR [V]	201.98	157.73	129.27	111.01
Resistencia electrodo [Ω]	0.112	0.088	0.072	0.062
Densidad de corriente [A/m²]	0.398	0.280	0.190	0.197
Potencial de tierra [V]	194.00	151.80	123.75	106.91
Tensión de paso [V/m]	7.79	5.60	4.78	3.37

Con lo que se confirma lo descrito, el comportamiento mejora significativamente en función del aumento del radio.

En la Figura 5.8 se aprecia la variación conjunta en el radio, mostrada a través del desplazamiento de los *peaks* en la distancia, y la reducción de los valores máximos por la cobertura de una mayor superficie.

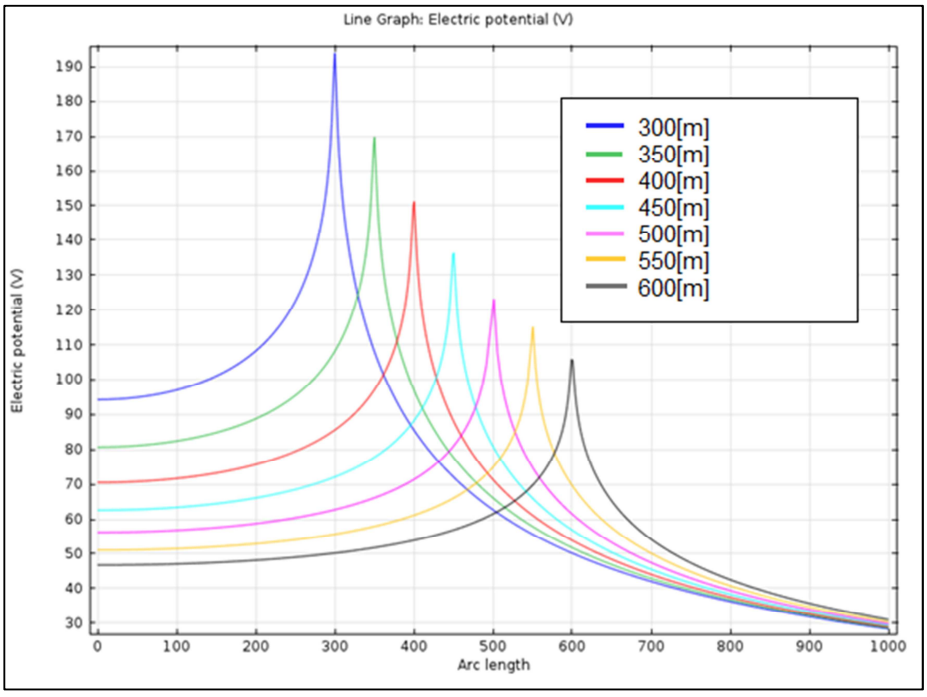

Figura 5.8: Distribución de potencial de superficie local en función del cambio en el radio del electrodo tipo anillo.

5.7. Variación en la capa de coque

La capa de coque representa el electrodo mismo, es el elemento que interacciona con el terreno. Acorde a la teoría aumentar la capa de coque que rodea al electrodo es ampliar su superficie de contacto con todo lo que esto implica. Los resultados se presentan en seguida:

Tabla 5.8: Efectos de la variación del espesor de la capa de coque.

Resultados	Espesor capa de coque [m]		
	0.3	0.6	1
GPR [V]	134.01	129.27	126.39
Resistencia electrodo [Ω]	0.074	0.072	0.070
Densidad de corriente [A/m²]	0.365	0.190	0.17
Potencial de tierra [V]	124.2	123.1	121.1
Tensión de paso [V/m]	4.92	4.78	4.72

Como se espera, un aumento en la sección de coque mejora los aspectos de seguridad en un margen razonable, reduce la tensión en la superficie, el potencial de paso, la densidad de corriente y la resistencia del electrodo mediante la expansión de la superficie de este. En realidad, aumentar la capa de coque de una sección de 0.6 a 1[m] para obtener menos de un 5% en cuanto a reducción de GPR no parece ser la alternativa más rentable, pero debe considerarse que la simulación considera principalmente los efectos geométricos y no las propiedades del coque que pueden resultar en un mejor desempeño generalizado incluidos los efectos termodinámicos del electrodo [5].

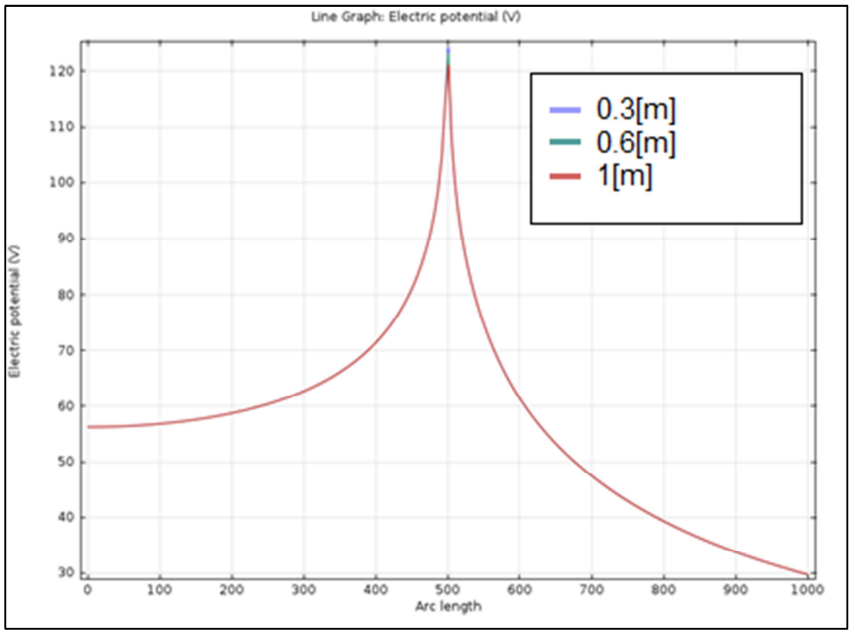

Figura 5.9: Distribución de potencial de superficie local en función del cambio de la sección del electrodo tipo anillo.

En la Figura 5.9 se presentan las tres curvas para los casos de distinta sección de coque, se nota una superposición entre ellas que difícilmente permite distinguir más allá de la diferencia entre el valor máximo de la tensión en cada uno de ellos.

6. Casos Prácticos de Aplicación

En este capítulo se plantean diversos modelos presentados en la bibliografía, con el objetivo de validar y presentar elementos que faciliten el análisis bajo diversas circunstancias. Además, se realizan variaciones de los casos expuestos que muestran diferentes planteamientos, tipos de electrodos y análisis de estudio.

6.1. Ejemplos de electrodo anillo

Estos modelos basados en lo que se presenta en [32], tienen por objetivo ejemplificar la utilidad de la metodología de resolución por método de las imágenes propuesta por Vallejos.

El esquema se expone en la Figura 6.1 y consiste en un modelo simple de dos capas. Este presenta la versión genérica del modelo utilizado para la validación del método y para el caso base del capítulo de sensibilidad, como parámetro la profundidad de la primera capa (H) y las resistividades de la capa superior e inferior (ρ_1y ρ_2), las variables dependen de un electrodo anillo de sección (s), diámetro (D) y profundidad de enterramiento (h) variable.

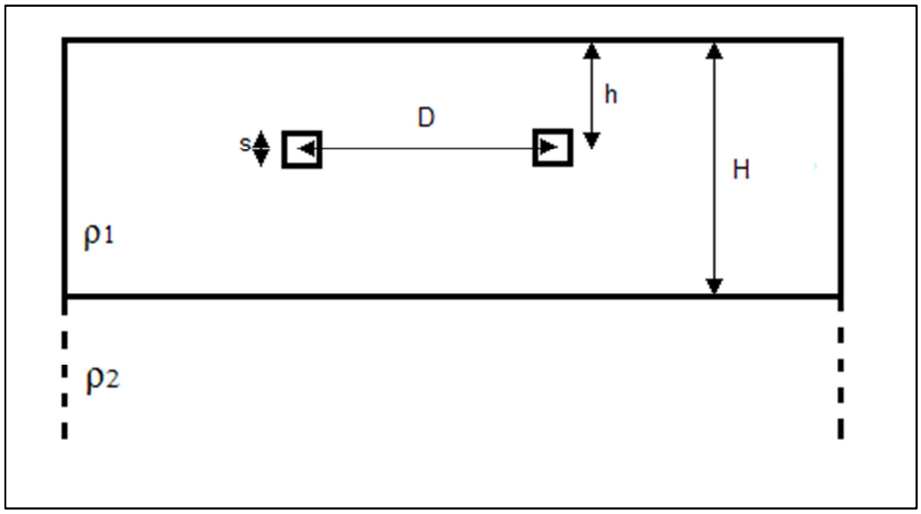

Figura 6.1: Modelo genérico de electrodo anillo en terreno de dos capas.

Para la comparación se opta por un modelamiento axi-simétrico, a través de este se evaluará la distribución de potencial para cada uno de los electrodos propuestos mediante comparación directa.

Tabla 6.1: Comparación de resultados para diseños de electrodo tipo anillo.

Modelo	Diámetro [m]	Profundidad [m]	Resistencia electrodo [Ω]	Tensión electrodo [V]	Tensión de paso [V/m]	Tensión de paso límite [V/m]	Densidad de corriente [A/m^2]
1	400	2	0.619	1701.07	20.63	8	1.094
			0.612	1685.70	22.78		1.049
Diff[%]			1.1	0.9	-10.42		4.11
2	940	2	0.310	852.13	7.98	8	0.466
			0.305	840.12	9.01		0.433
Diff[%]			1.6	1.4	-12.91		7.08
3	780	4	0.361	991.99	7.81	8	0.561
			0.356	979.84	8.34		0.533
Diff[%]			1.4	1.2	-6.79		4.99

Se aprecia de la fila de diferencias, obtenidas con respecto al valor obtenido en [32], que en las tensiones de paso se encuentran diferencias significativas. En ningún caso desarrollado usando el método de elementos finitos se cumple el criterio de la tensión de paso límite impuesta en el paper, mientras que en la referencia dos de estos casos si la cumplen (aunque al límite).

En cuanto a los problemas descritos, la mayor diferencia se presenta en el plano local, en la difusión del campo entre electrodo y la superficie del terreno. La diferencia no resulta tan significativa entre los *peaks* alcanzados en todos los casos como en la diferencia de potencial entre puntos cercanos.

Para mostrar el importante gradiente existente, se presenta un corte transversal desde el centro del electrodo y la curva de distribución de potencial respecto al eje en la superficie del terreno.

Se observa de las figuras, realizadas a partir del modelo 1 desarrollado en [32], que la zona en que se concentra el potencial más elevado es muy reducida y decae extremadamente rápido a medida que aumenta la distancia, luego es razonable suponer que una pequeña diferencia inicial conlleva una diferencia mayor en el sector en que la pendiente del potencial es más inclinada.

Como criterio de seguridad, en todos los casos resulta más conservador el valor obtenido por el método de elementos finitos, por ende es recomendable tomar medidas de mitigación en los casos propuestos. De todas maneras, tanto el método de elementos finitos como el de las imágenes presentan respuestas acorde a lo esperado en función del cambio de variables de cada modelo.

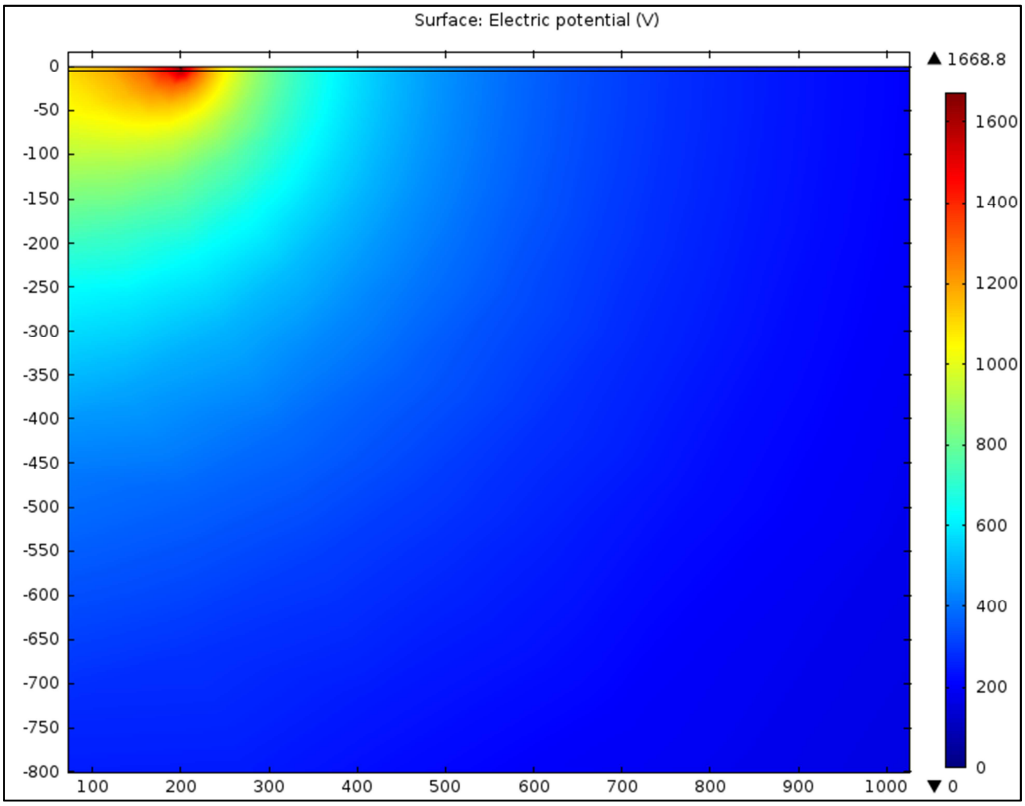

Figura 6.2: Corte transversal. Distribución de potencial.

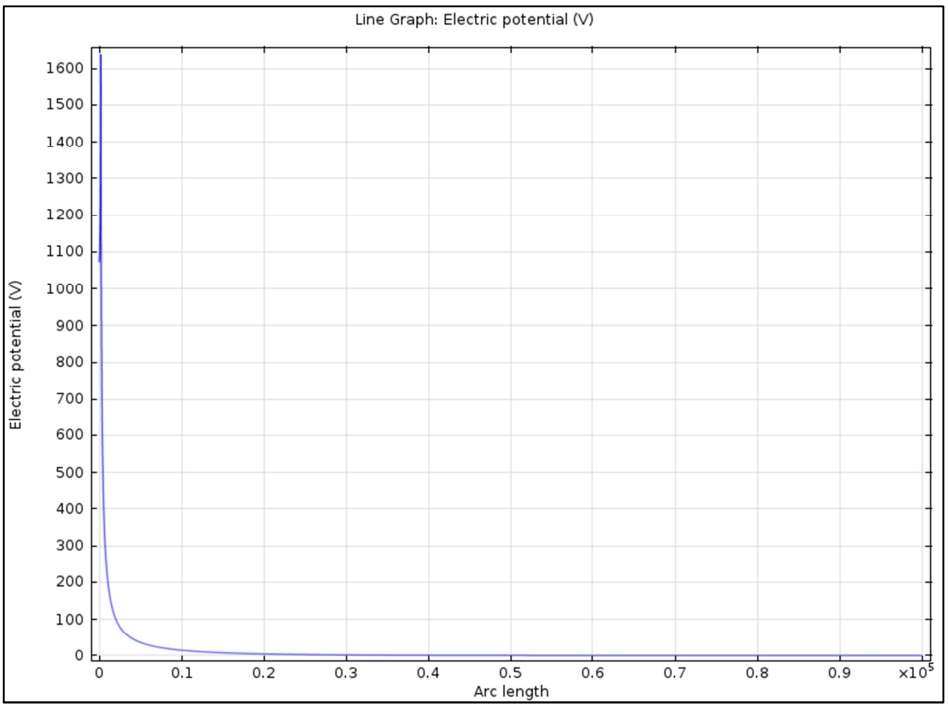

Figura 6.3: Distribución de potencial superficial en dirección radial.

6.2. Itaipú

Estos modelos tienen como objetivo plantearse de acuerdo a lo entregado en el paper [19] y contrastar además con los resultados obtenidos tras la medición real en [3].

Este es un caso real de aplicación por lo que se puede constatar el nivel de certeza en función a valores reales, pudiendo de esta forma reconocer el nivel de error esperable al aplicar esta u otras metodologías.

Las simulaciones desarrolladas corresponden a los dos electrodos presentados:

6.2.1. San Roque

Este modelo sirve para el planteamiento de un caso especial de capa inclinada e ilustra la capacidad del método de elementos finitos para trabajar en casos irregulares.

El modelo realizado consiste en dos capas: una superficial en que se encuentra el electrodo consistente en roca sedimentada de un buen nivel de resistividad y una capa inferior de roca cristalina de alta resistividad. La inclinación se muestra en la figura:

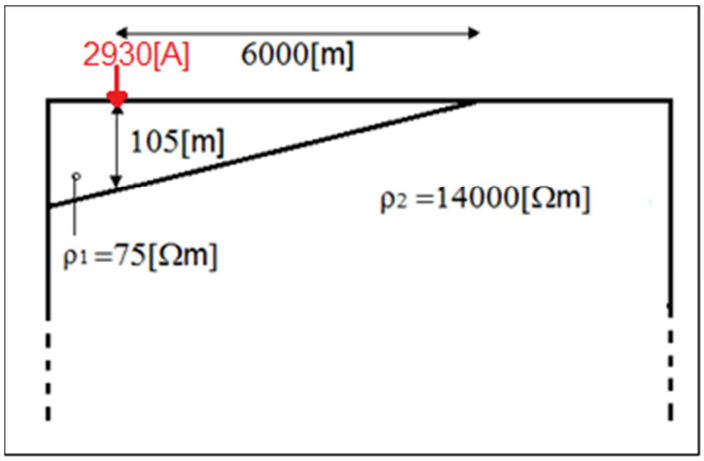

Figura 6.4: Modelo de terreno para electrodo Iguazú-San Roque.

Para el modelamiento, se genera un plano inclinado en el ángulo requerido, se proyecta dicho plano para posteriormente usando la función de diseño geométrico intersección, crear la sección de terreno de roca sedimentaria. Usando el método de diseño tradicional, se crea la sección de roca cristalina, debido a ser la roca sedimentaria un subconjunto del dominio total COMSOL los reconoce como distintos dominios que pueden ser caracterizados por distintos materiales.

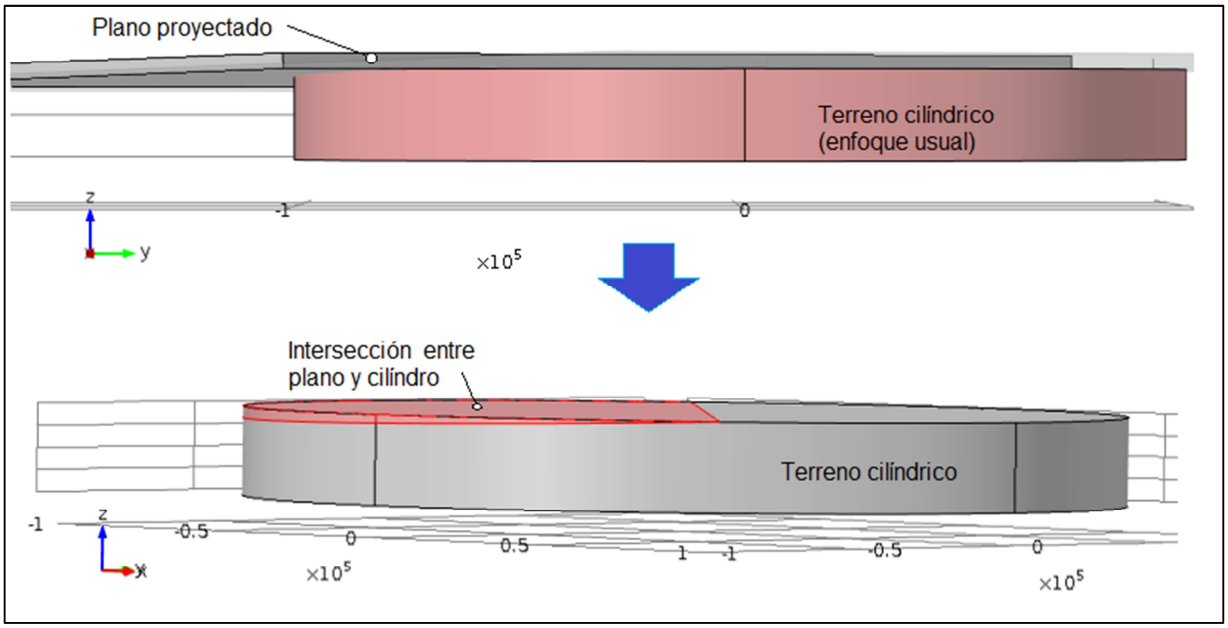

Figura 6.5: Modelamiento de electrodo Itaipú - San Roque.

Con el fin de simplificar el modelo de fuente se empleará una carga puntual de corriente enterrada. Este modelo debe ser tridimensional producto de la asimetría que presenta, por lo que la reducción en el cómputo del electrodo y la capacidad de usar un enmallado menos fino es apreciable.

El modelo es realizado para un terreno de 100[km] de radio y 20[km] de profundidad.

El resultado obtenido para la distribución de potencial en este caso se muestra a continuación en la Figura 6.6.

Al igual que en el resultado esperado en [19], el borde entre las superficies de los distintos tipos de terreno es evidente. En el costado de instalación del electrodo, con dirección a la roca sedimentaria, se muestra un patrón de curva similar a los observados en capítulos anteriores, circunferencial en este caso del lado que favorece la transmisión, mientras que del lado de la roca cristalina el potencial decae rápidamente.

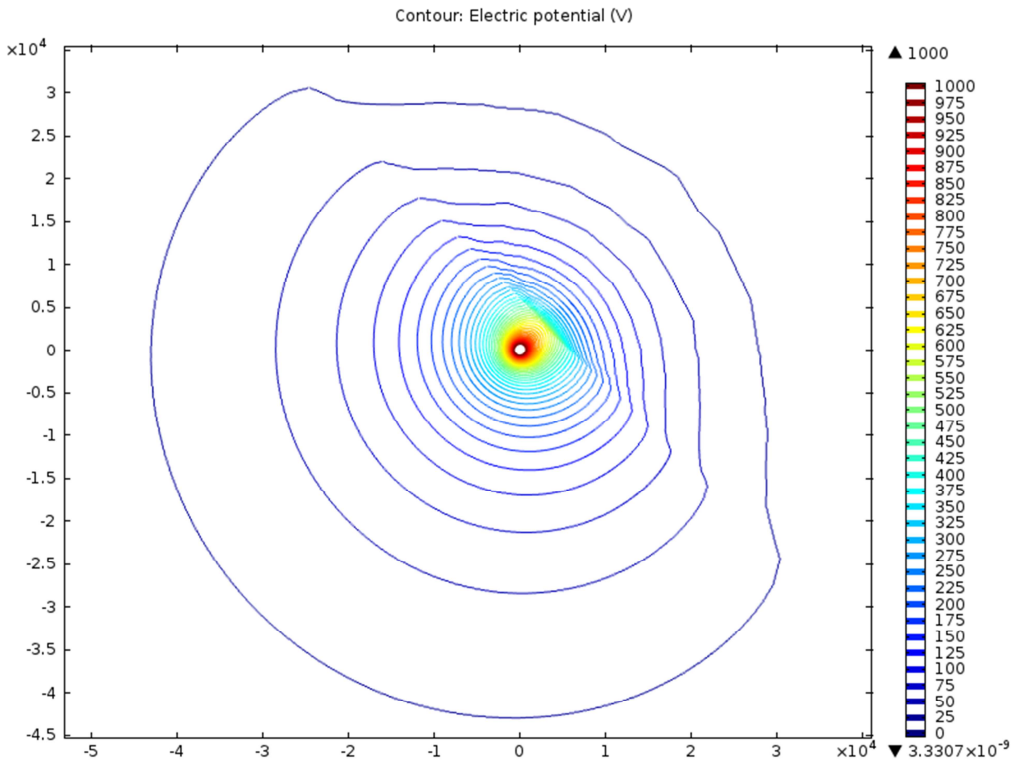

Figura 6.6: Curvas equipotenciales para el modelo de suelo de San Roque.

Se puede observar para las curvas de distribución de potencial (Figura 6.7 y Figura 6.8) en el plano superficial, dirección radial, diferencias en la pendiente. La caída de potencial mucho más evidente en dirección de la roca cristalina, así como un quiebre apreciable en el punto de cambio entre medios conductivos.

Ambas curvas están correctamente predichas y se condicen con lo anticipado por la evaluación teórica realizada en [19]. En cuanto a las mediciones de [3], la comparación genera errores, aunque con fines prácticos son aceptables. Los principales puntos de error tienen relación con la heterogeneidad de terreno, en las mediciones se tienen distintas fuentes de interferencia terrenos complejos e interacciones que no pueden ser anticipadas. Sin embargo, las simulaciones entregan resultados aceptables que permiten estimar de manera apropiada la distribución de potencial.

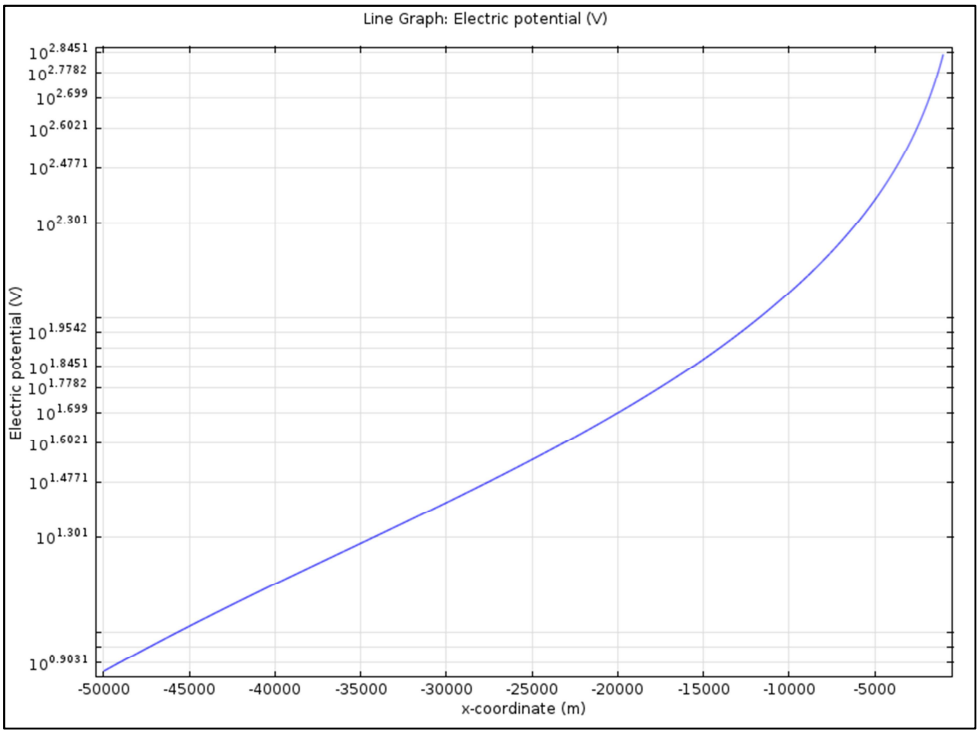

Figura 6.7: Curva semilogarítmica de distribución de potencial superficial. Dirección roca sedimentaria.

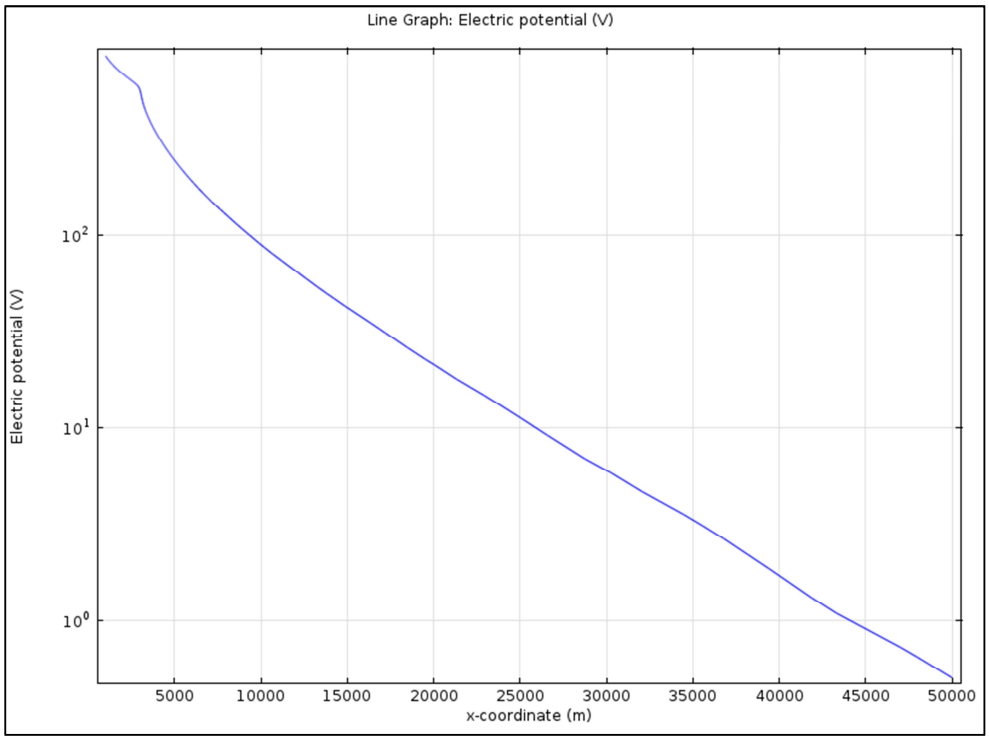

Figura 6.8: Curva semilogarítmica de distribución de potencial superficial. Dirección roca cristalina.

6.2.2. Foz de Iguazú

Este modelo es un modelo estratificado horizontal de cuatro capas. A diferencia del modelo anterior, esta simulación tiene características simétricas, lo que permite emplear el modelado axi-simétrico. Esto permite realizar un análisis local al introducir un electrodo de características definidas, en este caso: radio 400[m], profundidad 3[m] y sección de coque 0.6[m]. La corriente es igual al caso de San Roque 2930[A].

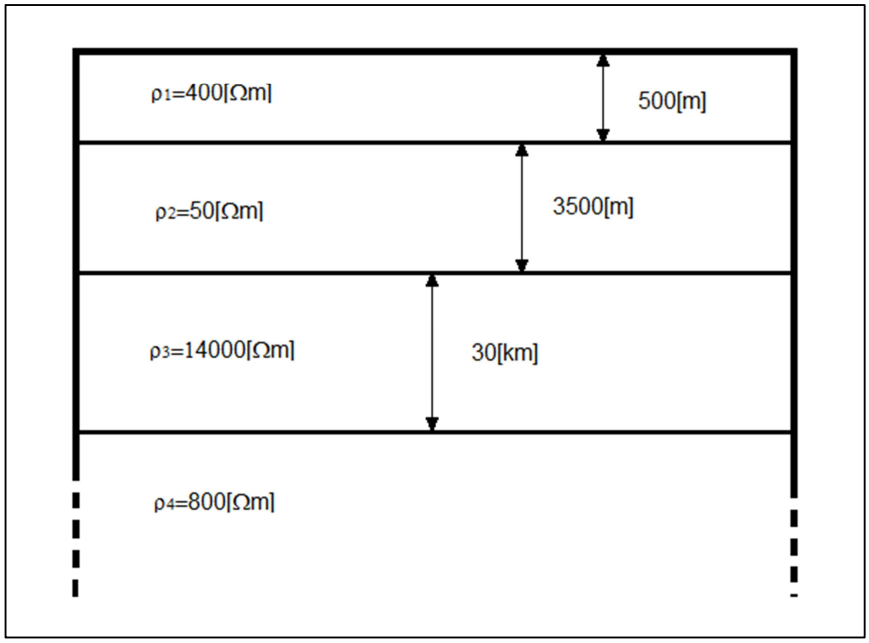

Figura 6.9: Modelado de terreno de 4 estratos Itaipú – Foz de Iguazú.

Los resultados locales obtenidos para la simulación son:

Tabla 6.2: Resultados de estudio local, electrodo Itaipú – Foz de Iguazú.

Tensión de electrodo [V]	Resistencia de electrodo [Ω]	Tensión de terreno [V]	Tensión de paso [V/m]	Densidad de corriente [A/m^2]
853.72	0.291	789.69	10.195	0.308

Debe remarcarse que en todos los tópicos del estudio local se recogen los valores máximos entregados por el modelo.

El gráfico de curvas equipotenciales se muestra a continuación. Tal y como se espera, presenta las características de un terreno homogéneo de estratificado horizontal, con curvas perfectamente circulares.

Se presenta además, la curva de potencial en función a la distancia del centro del electrodo para reafirmar lo presentado en el diagrama de curvas equipotenciales.

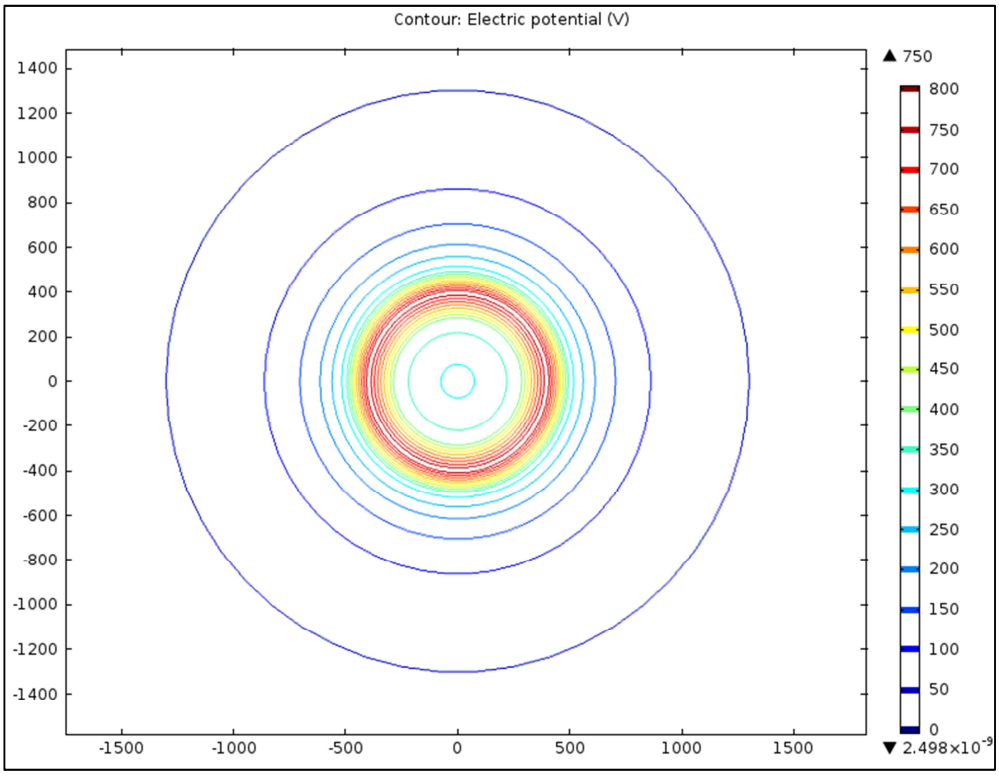

Figura 6.10: Curvas equipotenciales, electrodo Itaipú - Foz de Iguazú.

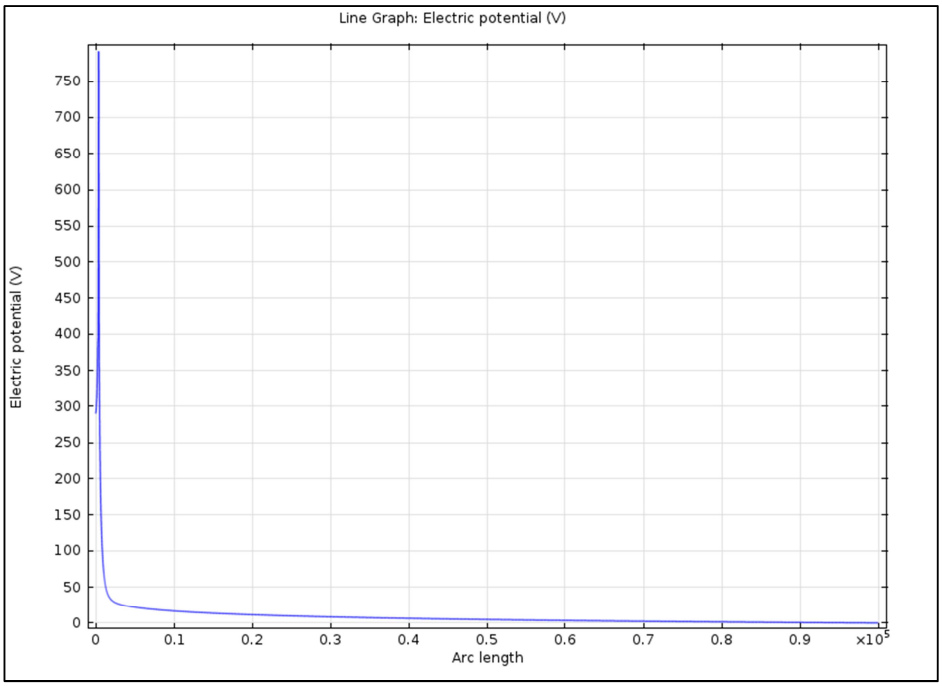

Figura 6.11: Distribución de potencial en dirección radial, electrodo Itaipú – Foz de Iguazú.

6.3. Análisis de electrodo influenciado por el mar

Este estudio intenta replicar el estudio realizado en [21]. En este trabajo se estudia la distribución de potencial superficial en distribuciones complejas de terreno mediante una variante del método de las imágenes.

Los modelos de terreno planteados consisten en un modelo simple de dos capas y un modelo similar con un quiebre abrupto a 50[km] del electrodo, en que se encuentra una capa vertical marina. Al tratarse de un medio mucho más abundante y de menor resistividad que la tierra misma, es de gran importancia conocer el efecto de la influencia marina sobre la distribución de potencial.

El modelo con capa vertical tiene un gran nivel de complejidad a nivel de cálculo, por tratarse de un terreno irregular que requiere un gran nivel de extensión para abarcar la capa vertical ubicada a una distancia considerable.

Las características del electrodo son: electrodo anillo, diámetro 600[m], profundidad 4[m] y corriente inyectada de 3000[A]. Al no detallarse una sección de coque se utiliza para el modelamiento un electrodo lineal, este tipo de modelamiento permite simplificar cálculos y reducir los requerimientos, pudiendo así alcanzar un mayor radio para el estudio de terreno.

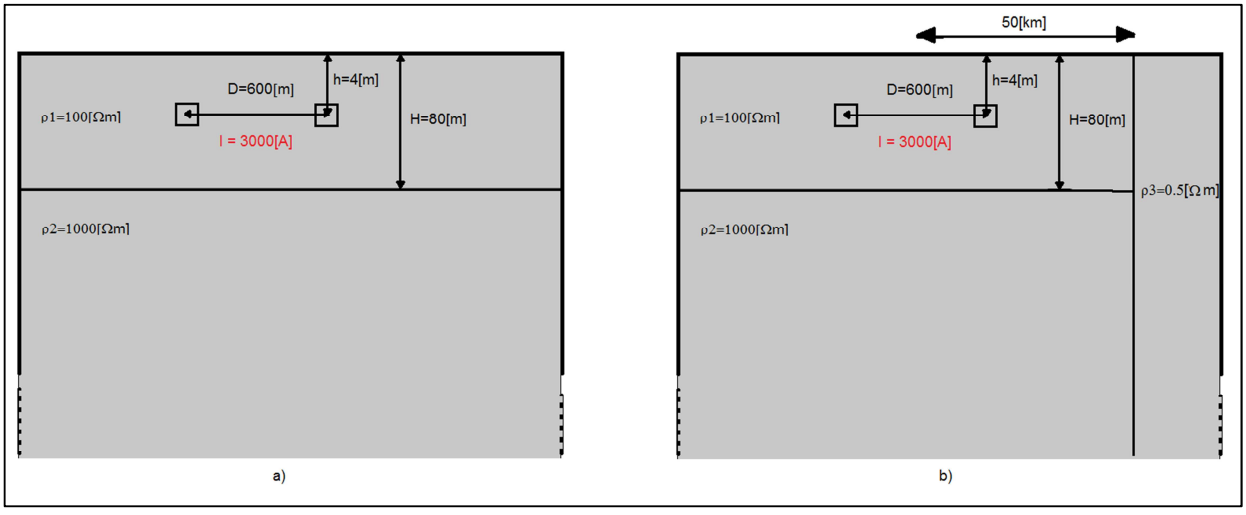

Figura 6.12: Modelos de suelo presentados en [21].

Los modelos descritos en la Figura 6.12 son a) un modelo de dos capas y b) un modelo de dos capas con una capa vertical a 50[km].

Los resultados muestran diferencias cuantificables entre los modelos presentados, para empezar puede apreciarse en la Figura 6.13 que la curva equipotencial no es

perfectamente circular. Además, al acercarse a la interfase tierra-mar, el potencial muestra un decaimiento más acelerado que el que se presenta en la dirección contraria o en el modelo sin influencia marina.

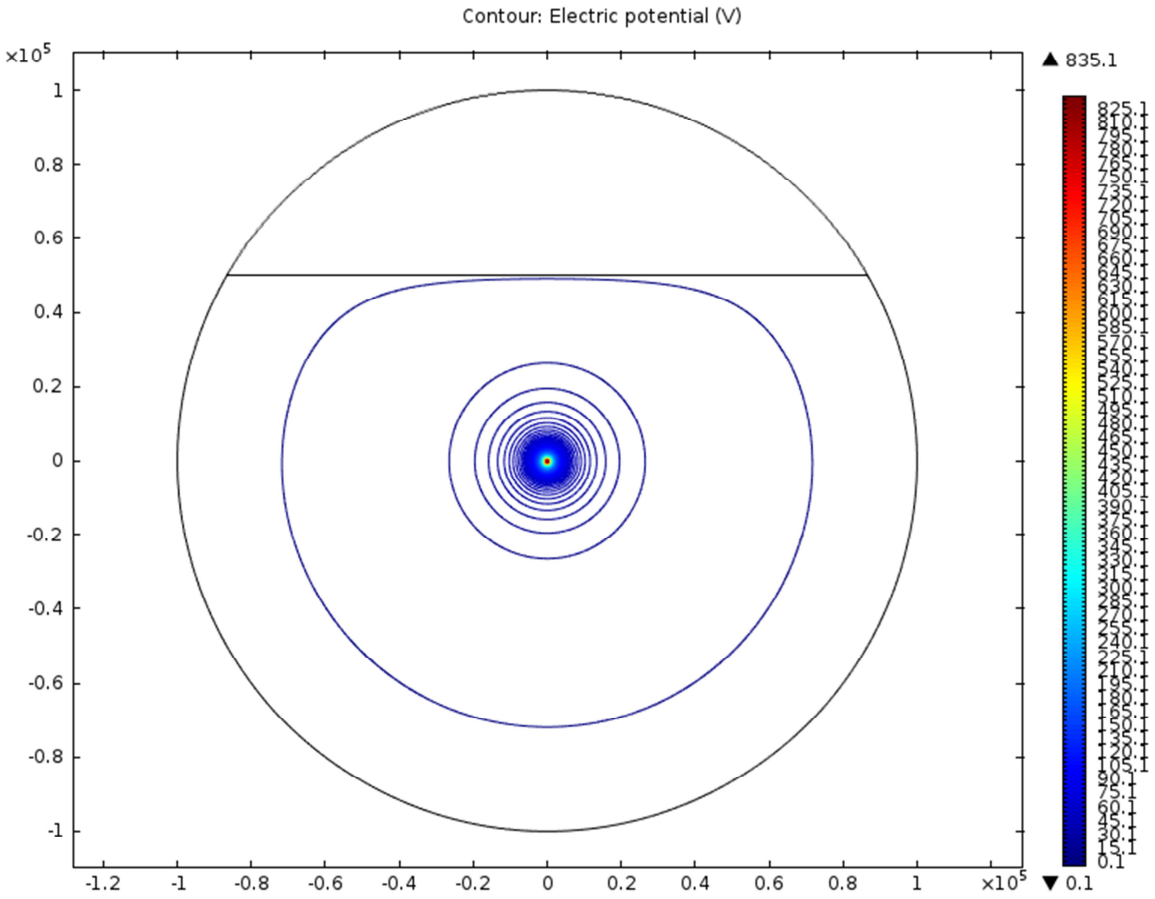

Figura 6.13: Líneas equipotenciales para un terreno bajo influencia marina a 50[km]

Haciendo el análisis para que, al igual que en [21], se tengan valores cada 10[km] y se pueda hacer al mismo tiempo un contraste de las respuestas obtenidas con distintos métodos. Además, se contrastarán los distintos modelos presentados.

Tabla 6.3 : Potencial superficial para los modelos presentados en [21].

Distancia al centro del electrodo [km]	Distancia a la interfase marina [km]	Potencial superficial Modelo 1 [21] [V]	Potencial superficial Modelo 1 COMSOL [V]	Potencial superficial Modelo 2 [21][V]	Potencial superficial Modelo 2 COMSOL [V]
-50	100	8.393	0.63	5.623	0.63
-40	90	10.49	1.49	7.523	1.51
-30	80	13.99	3.66	10.79	3.68
-20	70	20.97	9.60	17.51	9.67
-10	60	41.87	31.08	38.10	31.32
0	50	810.4	829.5	806.3	824.8
10	40	41.87	31.09	37.26	31.3
20	30	20.97	9.60	15.78	9.61
30	20	13.99	3.66	8.051	3.57
40	10	10.49	1.49	3.566	1.23
50	0	8.393	0.63	0.083	0.001

Se ve, una diferencia sostenida en ambos casos, en los ejemplos desarrollados con COMSOL se aprecia un mayor valor punta y un decaimiento más rápido en ambos casos. Esto puede explicarse por la limitación en la precisión de COMSOL y la necesidad de acotar el problema a un radio definido al emplear dicha técnica, al poner las condiciones de borde a mayor distancia el decaimiento esperado tiende igualmente a extenderse.

Desde otra aproximación, se observa que en el modelo 2, COMSOL hasta los 30[km] de distancia a la interfase no manifiesta diferencias significativas entre los potenciales. Esto puede explicarse considerando elementos como el refinamiento del enmallado y el tratamiento que se le da al error en los distintos métodos, para abarcar el área determinada con un electrodo el tamaño del menor elemento no puede ser muy refinada para un modelo 3D.

Como conclusión global se destaca que la presencia marina, aún sin estar a una distancia menor, influye sobre la distribución del potencial en terreno.

Entonces, si bien la magnitud de los valores no difiere en más de 20[V] se encuentran diferencias en la distribución del potencial para los métodos empleados.

Otro modelamiento de un electrodo influido por la presencia marina, incluso uno del tipo costa, puede ser realizado sin cortes abruptos de terreno como el presentado anteriormente. Se propone un modelo basado en un desplazamiento del plano del electrodo San Roque.

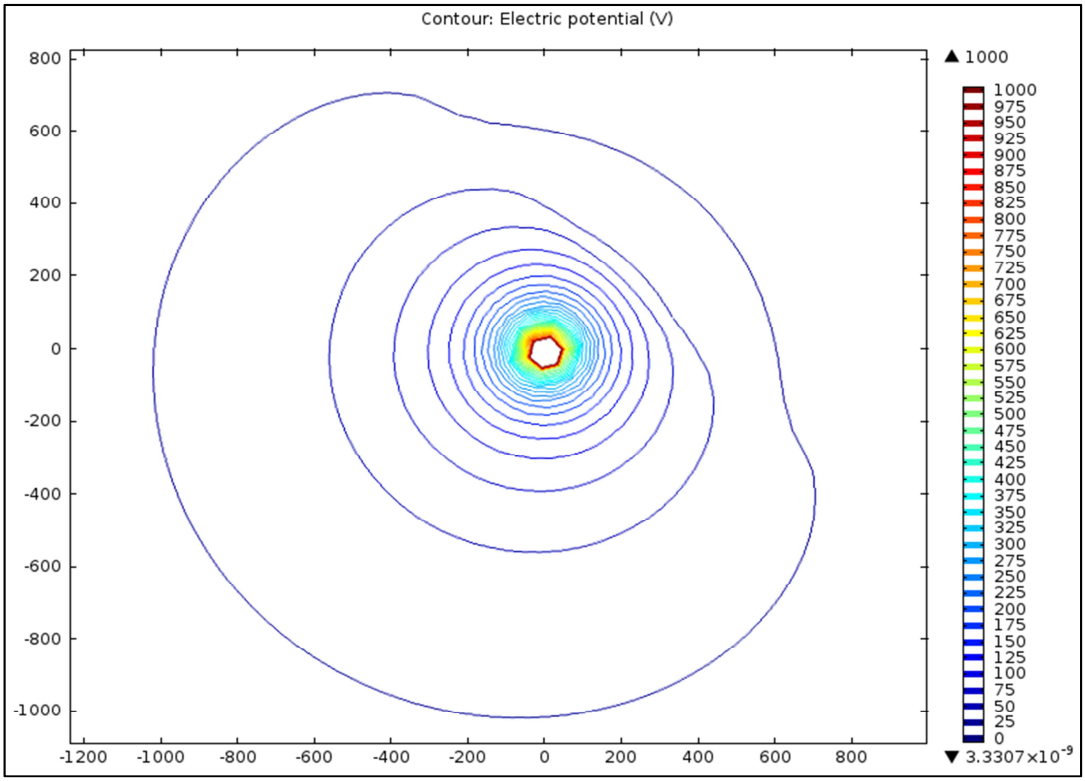

Figura 6.14: Modificación de modelo San Roque. Suelo sedimentario/ Mar.

La resolución de este modelo, más allá de presentar un modelo ligeramente más realista de la influencia marina sin profundizar en su comportamiento, intenta mostrar el uso de otros modelos para la resolución de un problema análogo. Desde la perspectiva de COMSOL la resolución del problema con distintos materiales se aborda de la misma perspectiva, para la elaboración de este modelo se desplaza el plano inclinado y se asigna al dominio menor las propiedades del agua de mar y al resto suelo sedimentario de 75[Ωm].

6.4. Electrodo lineal de costa

Este modelo presentado en [26] muestra el caso de un electrodo de costa lineal con capas de suelo separadas verticalmente. Como la influencia del agua marina ha sido

tratada previamente se utiliza este modelo para ilustrar el modelado de un distinto tipo de electrodo (de orientación vertical).

El modelo se presenta en la Figura 6.15, es una linea de electrodos basada en un electrodo del enlace Konti-Skan. Esta línea es paralela a la línea costera y está a 20 metros de la interfase tierra-mar, los electrodos están separados a 5[m] entre si, excepto los penúltimos a ambos extremos y los últimos, a 4 y 3[m] respectivamente con el fin de reducir efectos de borde. Al no mencionarse la profundidad en el *paper*, se consideran a ras de suelo, aunque en otras fuentes se indica su profundidad a poco más de un metro.

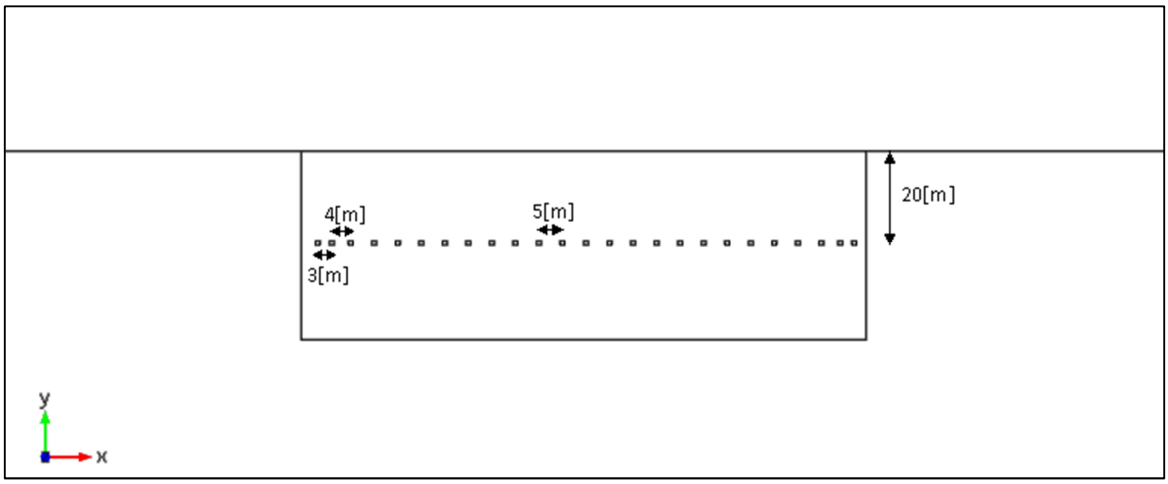

Figura 6.15: Electrodo lineal de costa.

Para el modelamiento de este caso se emplea un modelo de terreno con forma de paralelepípedo de 10x10x2[km] y cada electrodo se dibuja de forma independiente como una barra de coque de 1x1x3.5[m]. Esto muestra la factibilidad de estudiar distintas formas y configuraciones de electrodos mediante el uso de elementos finitos es factible. En la Figura 6.15, se muestra también una “caja” alrededor de los electrodos, ésta tiene como objetivo distinguirse como dominio para emplear un enmallado más fino en ese sector sin comprometer los alrededores.

Los valores del estudio local entregan los valores:

Tabla 6.4: Estudio de valores locales, electrodo lineal de costa.

	GPR [V]	Resistencia [Ω]	Tensión terreno [V]	Tensión de paso [V/m]	Densidad de corriente [A/m^2]
[26]	41	0.041	40	8	3.404
COMSOL	38.949	0.039	38.68	13.795	5.66

La distribución del potencial no presenta diferencias significativas en relación a lo antes mostrado sobre la interacción entre medios. Por tanto, sólo se dejan como referencia las figuras de las líneas equipotenciales y de la distribución en el volumen.

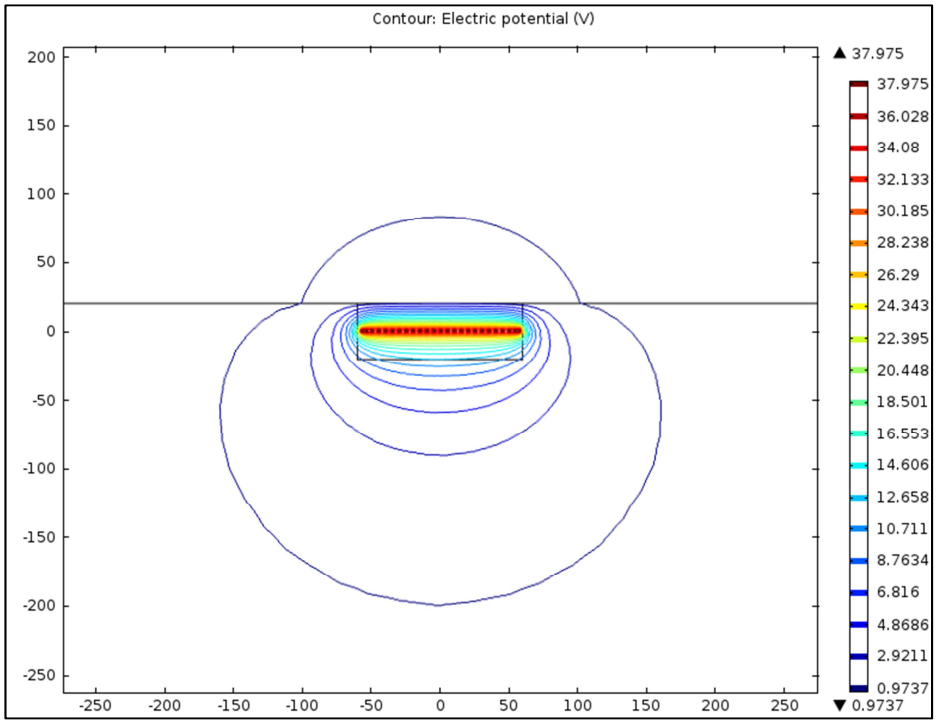

Figura 6.16: Líneas equipotenciales para un electrodo lineal de costa.

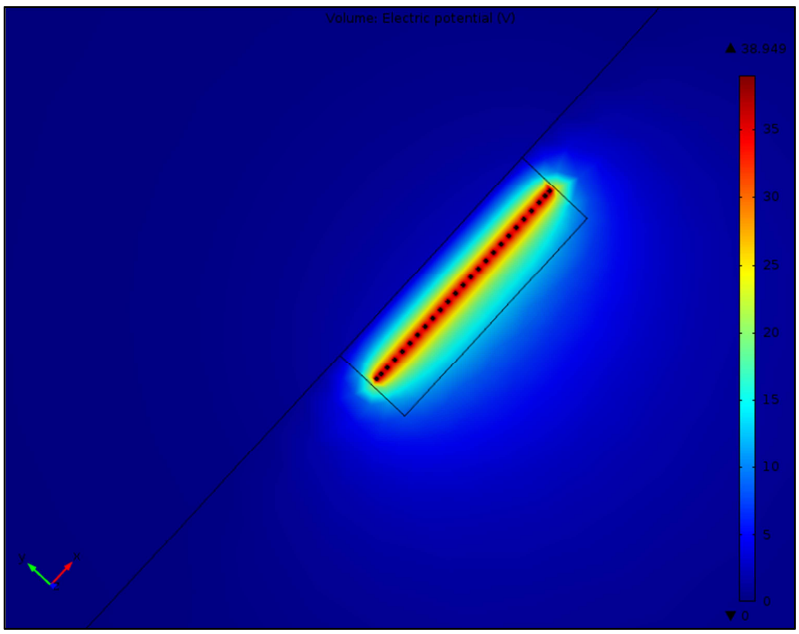

Figura 6.17: Distribución de potencial, volumen. Electrodo lineal de costa.

7. Conclusiones

En el presente documento, el software COMSOL Multiphysics fue empleado para la resolución del problema de la distribución de potencial eléctrico en terreno producto de la inyección de corriente en un electrodo de puesta a tierra para la transmisión terrestre en un sistema HVDC.

En una primera etapa, se plantean modelos de la bibliografía y se resuelven de forma directa para dictaminar su efectividad como herramienta de resolución para el problema propuesto. Luego, se realizan pruebas de sensibilidad ante parámetros y variables, así como ante características propias del modelo. Finalmente, se prueban alternativas de modelado para casos especiales, terrenos irregulares, fuentes lineales y puntuales.

Los objetivos propuestos para el trabajo se cumplen de forma bastante satisfactoria. El tema de diseño de electrodos se cubre en gran medida, dando pautas básicas y metodologías directamente aplicables recopiladas de la experiencia existente plasmada en las referencias bibliográficas.

El análisis y validación del método también es un tema descrito y resuelto en el presente. Los resultados obtenidos se consideran válidos para el rango estudiado, con excepción de casos puntuales, los resultados se acercan a lo esperado. Luego, se logra cumplir con el objetivo de establecer el método de análisis de elementos finitos para el caso del problema de la distribución del potencial y el gradiente. En consecuencia por su simplicidad y efectividad se considera el método propuesto como una alternativa válida para el diseño de puesta a tierra en sistemas HVDC.

7.1. Recomendaciones

En esta sección se presentarán recomendaciones en función de las dificultades surgidas durante la realización de este trabajo y se expondrán las conclusiones obtenidas a partir de este.

En cuanto a los resultados, pese a las aproximaciones y suposiciones empleadas para el modelamiento, se aproximan a los valores esperados y siguen las tendencias de acuerdo a la sensibilidad utilizada. De todas formas es fuertemente recomendable comparar los resultados obtenidos a los resultados de proyectos existentes cuyas mediciones ya hayan sido realizadas, con el fin de constatar no solo la validez de la metodología desde una perspectiva teórica sino que la aplicación a un caso realista, idealmente, de características semejantes.

Para aplicaciones de métodos numéricos es muy importante tener un computador con características mínimas recomendadas, se recomienda utilizar un computador con procesador multinúcleo para aprovechar el paralelismo, lo que ayuda a reducir los tiempos de ejecución, y memoria disponible (mínimo 16Gb RAM), en los modelos más complejos desarrollados en este trabajo se dan *peaks* de memoria RAM+virtual superior a 25 Gb.

Si se presenta la oportunidad de emplear una representación simétrica para simplificar el problema, por ejemplo, cilíndrica o esférica, no sólo es válido sino que totalmente recomendable emplear dicha metodología. Usando simetría se reducen los grados de libertad a procesar, lo que conlleva una reducción en el uso de memoria y el tiempo de procesamiento del problema.

El método presenta independencia de la geometría, por lo que explotando la simetría y/o realizando un enmallamiento apropiado, puede trabajarse con dominios de gran complejidad, como modelos multicapa o que presentan estratos de terreno en verticales o en ángulo. En ocasiones, es posible reducir el error trabajando con un enmallado diferenciado, muy concentrado en las zonas donde se espera exista mayor potencial y de menor densidad en la medida que se aleja de estos sectores.

7.2. Trabajos futuros

En base al trabajo expuesto se proponen variados tópicos con posibilidad de ser trabajados en profundidad y desarrollados, ya sea como trabajo de investigación, memoria o tesis. Dichos temas se presentan a continuación:

- Realización de un software dedicado a elementos finitos para electromagnetismo, o más aún a la temática de la puesta a tierra para el caso de HVDC. En internet existen diversos códigos que presentan resoluciones de la ecuación de Laplace en Matlab y otros lenguajes, por lo que adaptar la programación y ajustarla a los requerimientos de la industria, ampliarlo a la aplicación en otros problemas, o desarrollar algoritmos de mapeo que permitan ampliar el terreno considerado, es factible.
- Desarrollo de las características térmicas del terreno y su influencia en la conductividad, o más aún, la resolución del problema termoeléctrico acoplado, con las dificultades que conlleva, por ejemplo, que deja de tratarse de un problema estático.
- Otros posibles temas a desarrollar dicen relación con los efectos negativos de los electrodos como la interferencia que provocan en otros equipos, por ejemplo, la saturación en transformadores de poder, y sus respectivos métodos de atenuación.

- Aplicación de medidas de mitigación ante los efectos negativos producto de la instalación de electrodos. Por ejemplo, la aplicación de capas de alta resistividad como relleno para reducir las tensiones superficiales o el uso de dispositivos para reducir la corrosión o la interferencia sobre los sistemas eléctricos.

Además, se plantea la necesidad de un curso de aplicación de métodos numéricos para la ingeniería eléctrica de pregrado en que se fomente el uso de método de elementos finitos, método de diferencias finitas o el método de elementos de contorno. Esto se debe a sus diversas aplicaciones y potencial para el desarrollo y la investigación, estas metodologías tienen usos prácticos en: estudios de máquinas eléctricas y transformadores, puesta a tierra a través de la simulación de pruebas e inversión de curva aparente, entre otros problemas.

8. Referencias

[1] Apuntes “Métodos Eléctricos”, Curso GF42A: Métodos de exploración geofísica [Consulta en línea: 05/07/2012] https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2005/2/GF42A/1/material_docente/objeto/76844

[2] CANNISTRA G., GRIMALDI A., MINENNA M., SYLOS LABINI M. Finite-element study of the current field produced by grounding electrodes by means of a double analogy between fields. Electrotechnical Conference, 1996. MELECON ’96, 8th Mediterrean. Volumen 3, Bari, pp. 1638-1641.

[3] CAROLI C.E., SANTOS N., KOVARSKY D., MARQUES M.A.M. Soil Surface Potentials Induced by Itaipu HVDC Ground Return Current, Part II – Measurements – IEEE/PES Winter Meeting, Nueva Orleans, 1987.

[4] CARRASCO Benavides, José Gregorio. Análisis de electrodos de puesta a tierra para sistema de transmisión en corriente continua en alta tensión. Tesis (Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Eléctrica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2010. 131h.

[5] CHEN F., ZHANG B., HE J. Influence of coke bed on HVDC grounding electrode heat dissipation. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, Issue 6, 2008.

[6] CIGRÉ Working Group 14.21 – TF2. General Guidelines for the Design of Ground Electrodes for HVDC Links, Julio 1998.

[7] DALZIEL, C.F. The Threshold of Perception Currents. IEEE Paper 54-209, N°13, Junio 1954.

[8] EPRI EL-2020. Project 1467-1. HVDC Ground Electrode Design. Agosto 1981.

[9] ESCUDERO Neumann, Ricardo Adolfo. Implementación de un sistema computacional para el cálculo de campos electrostáticos por el método de elementos finitos. Memoria (Ingeniería Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2003.

[10] FAUGSTAD K., O’BRIEN M., RASHWAN M., SMITH M., ZAVAHIR M. An environmental survey on the operation and impact of HVDC electrodes. Cigré Working Group B4-44. Osaka 2007.

[11] FERNÁNDEZ Cornejo, Jorge Mario. Evaluación de campo eléctrico estático en tres dimensiones por el método de elementos finitos. Memoria (Ingeniería Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1994.

[12] FRAU, J.I., GUTIÉRREZ, J. Transporte de Energía Eléctrica en Corriente Continua: HVDC. Revista Automática e Instrumentación, Abril 2005, No. 361.

[13] GIAO T., SARMA M. On the potential and field distribution around a ground electrode for HVDC transmission. Pp 2793-2801.

[14] GUO J., LU J., ZHANG W. Study on the optimized designing method of two electrodes commonly used by multi converter stations. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 12 al 1 de abril, Beijing, 2010.

[15] Handbook of cathodic protection – Theory and practice of elechtrochemical protection processes. 3d Ed.,Editado por Von BAECKMANN, W., SCHWENK, W., PRINZ, W. Houston, Gulf Publishing Company (Elsevier Science), 1997.

[16] IEEE STANDARD 80 2000 – Guide for Safety in AC Substation Grounding

[17] IEEE STANDARD 81 1983 – Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potential of a ground system part 1: Normal measurements.

[18] KIMBARK, Edward W. Direct Current Transmission, Vol. I. Portland, Wiley-Interscience, 1971. 508p.

[19] KOVARSKY D., PINTO L.J., CAROLI C.E., SANTOS N. Soil Surface Potentials Induced by Itaipu HVDC Ground Return Current, Part I – Theoretical Evaluation – IEEE/PES Winter Meeting, Nueva Orleans, 1987.

[20] LIU, G.R., QUEK, S.S. The Finite Element Method – A practical course. Oxford, Elsevier Science Ltd., 2003. 348p.

[21] LIU Q., CHENG L., ZHENG J., GUAN Z. Research on potential distribution of soil surface caused by ground electrode of HVDC system in heterogeneous soil structure.

[22] MA J., DAWALIBI F.P., RUAN W. Design considerations of HVDC grounding electrodes. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian (China).

[23] ORNL. HVDC Power transmission electrode siting and design. ORNL for US Department of Energy. 1997.

[24] ORTUONDO, P. Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra. Primera Ed., Imprenta América Ltda., Santiago, Chile 1997.

[25] PRABHAKARA F.S., TORRI J.F., DeCOSTA D.F., STEGER D.M., WILLIAMS T.W. Design, commissioning and testing of IPP ground electrodes. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 2037-2047.

[26] RUAN W., MA J., LIU J., DAWALIBI F.P., SOUTHEY R.D. Performance of HVDC ground electrode in various soil estructures. 2002, pp. 962-968.

[27] RUAN W., SOUTHEY R.D., FORTIN S., DAWALIBI F.P. Effective Sounding Depths for HVDC Grounding Electrode Design: Wenner versus

Schlumberger Methods. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian (China), 2005.

[28] SAMOUËLIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A., Richard G. Electrical resistivity survey in soil science: a review, Soil and Tillage Research, Volume 83, Issue 2, September 2005, Pages 173-193.

[29] SIEMENS. High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange. [Consulta en línea: 10-07-2012] http://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology_.pdf

[30] TYKESON K., NYMAN A., CARLSSON H. Environmental and geographical aspects in HVDC electrode design. IEEE Transactions in Power Delivery, Volume 11, Issue 4, 1996, pp. 1948-1954.

[31] VALLEJOS Hidalgo, Leopoldo Andrés. Proyecto de electrodo de puesta a tierra terrestre para sistema HVDC. Memoria (Ingeniería Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2008. 135h.

[32] VALLEJOS L., RAYO J., OLGUÍN G., SANTOS J.M. Dimensionamiento de electrodos de puesta a tierra tipo anillo para sistemas de transmisión HVDC. En: XIII ERIAC, Décimo tercer encuentro regional iberoamericano de CIGRÉ, Comité de Estudio B4 – Alta Tensión en Corriente Continua y Electrónica de Potencia, 24 al 28 de mayo de 2009.

[33] WANG J., WEN X., DU Z. Calculation of performance of UHVDC grounding electrode under the consideration of the self-resistivity of electrode. Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007).

[34] WANG S., MAO S., LU J., MEI G., WANG D., LI G. Influence of HVDC Ground Electrode Current on AC Transmission System and Its Restraining Measure. En: International Conference on Power System Technology, 2006.

[35] YUAN S., ZHANG D., SU F., CHEN R., CHEN W., ZHOU H. Research on common grounding electrode in HVDC. Pp. 456-460.

[36] ZHANG B., ZENG R., HE J., ZHAO J., LI X., WANG Q., CUI X. Numerical analysis of potential distribution between ground electrodes of HVDC system considering the effect of deep earth layers. IET Generation Transmission Distribution, 2008, 2, 2, pp. 185-191.