

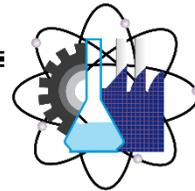


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

DISEÑO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA PARA UN SISTEMA HVDC

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

P R E S E N T A:

ING. ENRIQUE GAONA ESTRADA

DIRECTOR DE TESIS

DR. OUTMANE OUBRAM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGC certificado en la norma ISO 9001:2015

Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 13 de septiembre de 2019.

Dr. Luis Cisneros Villalobos
Dr. Mario Acosta Flores
Dr. Martha Roselia Contreras Valenzuela
Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar
Dr. Outmane Oubram
PROFESORES DE LA FCQeI
PRESENTE

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Gaona Estrada Enrique titulada: DISEÑO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA PARA UN SISTEMA HVDC realizada bajo la dirección del Dr. Outmane Oubram en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

DICTAMEN

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI

PRESENTE

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Luis Cisneros Villalobos	Aprobado	
Dr. Mario Acosta Flores	Aprobado	
Dra. Martha Roselia Contreras Valenzuela	Aprobado	
Dr. J. Guadalupe Velásquez Aguilar	Aprobado	
Dr. Outmane Oubram	Aprobado	

**UA
EM**



CONTENIDO

CONTENIDO	I
ÍNDICE FIGURAS	V
ÍNDICE TABLAS	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
ALCANCE	X
ACRÓNIMOS	X
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Normatividad	3
1.2.1 IEC 61975 (2010)	3
1.2.2 IEC/TS 62344 (2013)	4
1.2.3 IEC TR 60919-1 (2017)	4
1.2.4 IEC 60919-2 (2008)	4
1.2.5 IEC 60919-3 (2008)	4
1.3 Objetivo general	5
1.3.1 Objetivos específicos	5
1.4 Hipótesis	5
1.5 Justificación	6
1.6 Impacto social y medio ambiente	6
1.7 Estructura del documento	7
Capítulo 2. SISTEMAS HVDC	8
2.1 Introducción	8
2.2 Configuraciones de un Sistema HVDC	11
2.2.1 Monopolar	11
2.2.2 Bipolar	12
2.3 Sistemas de puesta a tierra HVDC y HVAC	14
Capítulo 3. ELECTRODO Y SELECCIÓN DE SITIO	15
3.1 Introducción	15
3.2 Tipos de Electrodo	15
3.2.1 Electrodo Terrestres	15
3.2.1.1 Electrodo horizontales	15
3.2.1.2 Electrodo verticales	17



3.2.1.3	Electrodo de pozo profundo	18
3.2.2	Electrodos de Costa	19
3.2.3	Electrodos Marinos.....	20
3.3	Selección del sitio.....	20
3.4	Selección del tipo de electrodo	21
3.5	Propiedades básicas del electrodo	22
3.5.1	Resistividad del suelo.....	22
3.5.2	Conductividad térmica y capacidad de calor.....	22
3.5.3	Temperatura ambiente y temperatura máxima de operación	22
3.5.4	Humedad	23
3.6	Aspectos técnicos, económicos y tiempo de ejecución	23
3.6.1	Tiempo de operación del electrodo de puesta a tierra.....	23
3.6.2	Distancia de la estación convertidora.....	23
3.7	Etapas de investigación geofísica y geológica	24
3.7.1	Modelo inicial de resistividad.....	25
3.7.2	Estudios de campo iniciales	25
3.7.3	Selección del sitio.....	26
3.7.4	Derechos de vía, servidumbre de paso y adquisición del terreno	27
3.7.5	Investigaciones detalladas de campo	27
3.7.6	Modelo detallado de resistividad	28
3.7.7	Diseño preliminar y modelado del electrodo	28
3.7.8	Investigaciones de perforaciones de prueba	29
3.7.9	Mapeo geológico de núcleos de perforación.	29
3.7.10	Electrodo de prueba	30
Capítulo 4.	PARÁMETROS DEL ELECTRODO	31
4.1	Consideraciones en el Diseño.....	31
4.1.1	Gradiente de Potencial	31
4.1.2	Temperatura	33
4.1.3	Efectos del electrodo terrestre en otras instalaciones	34
4.1.4	Corrosión	35
4.2	Materiales del electrodo	37
4.2.1	Tamaño del electrodo.....	39
4.2.2	Conductor Interno.....	39
4.2.3	Material de Relleno.....	40
4.2.3.1	Sección transversal de coque	41
4.2.4	Diámetro de conductor interno	41
4.2.5	Profundidad de instalación	42



4.2.6	Resistencia del electrodo	43
4.2.7	Características térmicas del electrodo	43
4.2.8	Vida útil del electrodo	45
4.2.9	Extensiones futuras	46
4.3	Estudios de impacto	47
4.3.1	Datos	47
4.3.2	Rangos de operación y condiciones de uso del electrodo:	48
4.3.3	Variables físicas	49
4.4	Enlace estación convertidora – EPT	51
4.4.1	Enlace mediante líneas aéreas	51
4.4.2	Línea de enlace con cable	53
Capítulo 5.	DISEÑO DEL ELECTRODO.....	55
5.1	Generalidades	55
5.1.1	Métricas y criterios de seguridad.....	58
5.1.2	Tensiones de paso, contacto y metal-metal.....	61
5.1.2.1	Potencial transferido.....	62
5.1.2.2	Gradientes eléctricos en el agua.....	63
5.1.3	Criterios de diseño físico y restricciones	66
5.1.3.1	Condiciones operativas del electrodo	66
5.1.3.2	Ciclo de vida del proyecto	68
5.1.3.3	Confiabilidad.....	68
5.1.3.4	Polaridad anódica y operación catódica.....	69
5.1.3.5	Densidad de corriente	70
5.1.4	Impactos potenciales ambientales y de infraestructura	70
5.1.4.1	Elevación de Potencial en Tierra (“GPR” Ground Potential Rise)	70
5.1.4.2	Impacto de interferencia eléctrica y corrosión.....	71
5.1.4.3	Campo magnético	71
5.1.5	Factibilidad de construcción	71
5.1.6	Datos requeridos para el diseño	72
5.1.6.1	Corriente.....	72
5.1.6.2	Propiedades físicas y químicas del suelo	73
5.2	Consideraciones de diseño	73
5.2.1	Estabilidad térmica y rango de corriente	74
5.2.2	Contenido de humedad del suelo y electro-ósmosis	74
5.2.3	Consideraciones de operación y mantenimiento	75
5.2.3.1	La inspección debe cubrir lo siguiente:	76
5.2.3.2	Cálculos sencillos	76



5.2.3.3	Verificación del diseño.....	77
5.3	Procedimiento de diseño.....	78
5.4	Ejemplo de diseño de un electrodo de puesta a tierra.....	81
5.4.1	Condiciones y criterios de diseño.....	81
5.4.2	Parámetros de diseño.....	81
5.4.3	Consideraciones de seguridad (potenciales).....	81
5.4.4	Estabilidad térmica y corrientes.....	82
5.4.5	Corriente entre sub-electrodos.....	83
5.4.6	Densidad de corriente.....	84
5.4.7	Resistencia de puesta a tierra del electrodo.....	84
5.5	Costo estimado de construcción del EPT.....	85
Capítulo 6. PUESTA EN SERVICIO E IMPACTO DE OPERACIÓN.....		86
6.1	Medición de parámetros del electrodo de puesta a tierra.....	86
6.1.1	Temperatura del suelo.....	86
6.1.2	Humedad del suelo.....	87
6.1.2.1	Nivel de agua.....	87
6.1.3	Medición de resistencia.....	88
6.1.4	Resistencia de sub-electrodos.....	90
6.1.5	Mediciones de distribución de corriente.....	90
6.1.5.1	Arreglos temporales.....	90
6.1.5.2	Distribución de corriente.....	90
6.1.5.3	Baja corriente.....	90
6.1.5.3.1	Alta corriente.....	91
6.1.6	Mediciones de potencial y gradiente.....	91
6.1.6.1	Tension de paso.....	91
6.1.6.2	Tensión de contacto.....	92
6.2	Impacto en infraestructura.....	92
6.2.1	Sistemas de CA.....	92
6.2.2	Objetos metálicos enterrados.....	95
6.2.2.1	Objetos metálicos no aislados.....	95
6.2.2.2	Objetos metálicos aislados.....	96
6.3	Impactos en el ambiente.....	97
6.3.1	Impacto en flora y fauna.....	97
6.3.2	Aspectos químicos.....	98
6.4	Medidas de mitigación.....	99
Capítulo 7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....		102
7.1	Introducción.....	102



7.2	Conclusiones	102
7.3	Trabajos Futuros	103
Referencias Bibliográficas		104

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema básico de transmisión HVDC	8
Figura 2.2	Gráfica Costo - Distancia [14].	10
Figura 2.3	Tensión óptima en función de la potencia de la estación convertidora y la longitud de la línea de transmisión de CD [14].	10
Figura 2.4	Arreglo Monopolar	11
Figura 2.5	Arreglo Bipolar	12
Figura 2.6	Falla en arreglo Bipolar. Retorno por tierra/mar	13
Figura 2.7	Falla en arreglo Bipolar. Retorno metálico	13
Figura 2.8	SPT y EPT para sistemas HVDC y SPT para sistemas HVAC	14
Figura 3.1	Electrodo Horizontal (a)	16
Figura 3.2	Electrodo Horizontal (b)	17
Figura 3.3	Electrodo Horizontal (c).....	17
Figura 3.4	Electrodo Vertical	18
Figura 3.5	Electrodo pozo profundo	19
Figura 4.1	Gradiente de voltaje.	32
Figura 4.2	Corrosión en metales	35
Figura 4.3	Protección catódica con rectificador CD.	36
Figura 4.4	Protección catódica con ánodo galvánico.....	37
Figura 4.5	Sección del electrodo superficial.	38
Figura 4.6	Sección electrodo profundo.	38
Figura 4.7	incremento de la temperatura del electrodo.	44
Figura 4.8	Configuración conceptual del enlace mediante líneas aéreas	52
Figura 5.1	Diagrama de flujo conceptual del procedimiento de diseño del electrodo	55
Figura 5.2	Criterios de seguridad propuestos [25].	57
Figura 5.3	Figura conceptual de la tensión de paso, tensión de contacto y tensión de contacto metal- metal y el correspondiente criterio de seguridad [13].	61
Figura 5.4	Concepto de potencial transferido [13].	62
Figura 5.5	Figura conceptual de gradientes de potencial seguros en el agua [25]	64
Figura 5.6	Comparación de corrientes de fibrilación de humanos y animales [25].	65
Figura 5.7	anillo sencillo y sección transversal de coque.	82



Figura 5.8 Doble anillo y sección transversal de coque.....	82
Figura 6.1 Diagrama de medición de temperatura del suelo [31].	87
Figura 6.2 medición de la resistencia de puesta a tierra [31]	88
Figura 6.3 Impedancia vs distancia.....	89
Figura 6.4 Ángulo entre los conductores de corriente (B) y potencial (C)	89
Figura 6.5 Polaridad invertida para reducir efectos de polarización [31].....	90
Figura 6.6 Sistema de CA expuesto al campo eléctrico generado por la CD en tierra [13].	93

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1 Tensión óptima en función de la potencia de la estación convertidora y la longitud de la línea de transmisión de CD	10
Tabla 4.1 Distancias entre electrodos y subestaciones conversoras y potenciales inducidos.	34
Tabla 5.1 Procedimiento de diseño.....	78
Tabla 5.2 Condiciones de diseño, corrientes nominales y criterios de diseño	81
Tabla 5.3 Parámetros de diseño	82
Tabla 5.4 Aumento máximo de temperatura del electrodo	83
Tabla 5.5 División de corrientes entre sub-electrodos	84
Tabla 5.6 Densidad de corriente calculada en la interface coque-suelo	84
Tabla 5.7 Resistencia de puesta a tierra del electrodo.....	84
Tabla 5.8 Costo estimado de construcción del EPT	85
Tabla 6.1 Impacto y medidas de mitigación del electrodo [13].	99



AGRADECIMIENTOS

En estas líneas expreso mi gratitud a todas las personas que hicieron posible finalizar de forma exitosa esta etapa profesional; en particular a quienes colaboraron en el desarrollo de este trabajo de tesis, y en general a quienes aportaron durante esta etapa de mi carrera profesional, con un esfuerzo de tres años, conjugado con las responsabilidades laborales y familiares.

En primer lugar, dedicó este trabajo con todo cariño a mi familia, en especial a mi esposa y compañera de vida Ariz, que siempre dio impulso a seguir adelante, a mis queridos hijos Jarib, Doris y Román, aún a su corta edad, saben que el esfuerzo es para un bien común y lo trascendente es el ejemplo que aprenden con ello.

A mis padres y hermano, quienes no sólo durante mi estancia del posgrado, han mostrado interés y apoyo en los objetivos trazados en el transcurso de mi existencia.

A mis suegros que son un motor aliciente de como valorar el avance profesional, de vida y siempre confiaron en que llegaría a la meta.

A mis amigos y compañeros de la maestría, quienes han permanecido a través de los años y sin duda seguirán presentes en la nueva etapa como maestro en ingeniería que está por comenzar.

A la Universidad Autónoma de Morelos, que gracias al apoyo que sus profesores que siempre entregan una sólida formación teórica y práctica en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, que tiene a su cargo el posgrado de Maestría en Ingeniería Eléctrica Electrónica (MIEE), en especial a mi asesor el Dr. Outmane Oubram, por la confianza y apoyo brindado durante el desarrollo de mi proyecto de tesis, que coadyuvó a lograr el objetivo del posgrado.



RESUMEN

Hoy en día, la demanda de energía eléctrica ha crecido de manera exponencial, lo que ha provoca que las grandes compañías de generación de energía eléctrica tomen en cuenta la expansión de los sistemas de transmisión en corriente alterna (CA) o la búsqueda de posibles alternativas que ayuden a satisfacer la demanda de energía, que no solo se requiere a gran escala, sino que también se busca satisfacer los puntos más lejanos de consumo y por supuesto al menor costo posible. Basado en lo anterior, una de las formas más eficientes para transportar la energía eléctrica con un menor porcentaje de perdidas, son los sistemas de Transmisión en Alta Tensión en Corriente Directa "HVDC" y uno de los componentes esenciales de este sistema de transmisión, corresponde al "Electrodo de Puesta a Tierra" (EPT), que presenta una característica de operación diferente a la transmisión tradicional de energía eléctrica en Corriente Alterna (CA), y tiene dos propósitos, el primero es el de fijar referencia a 0 volts, y el segundo es permitir una ruta alternativa de la corriente cuando ciertos equipos e instalaciones fallen, aumentando la confiabilidad del sistema.

Por lo que esta tesis se enfoca de manera puntual en el electrodo de puesta a tierra, en particular a la configuración monopolar o bipolar con retorno por tierra de un sistema HVDC, identificando los parámetros y criterios que se deben tomar como información básica, apoyada por especificaciones técnicas, guías internacionales, artículos técnicos y literatura básica de sistemas HVDC, donde se obtendrá la información necesaria para realizar un procedimiento de diseño del EPT, que proporcionará a los ingenieros encargados de las primeras líneas HVDC en México, un documento que contenga los pasos necesarios para realizar el diseño, supervisión y mantenimiento de un EPT.



ABSTRACT

Nowdays the demand for electricity has grown exponentially, causing large power generation companies have to consider the expansion of AC transmission systems or the search for potential alternatives that help meet energy demand, which is not only required on a large scale, but also seek to meet the farthest points of consumption and of course at the lowest possible cost. Based on the above, one of the most efficient ways to transport electrical energy with a lower percentage of losses are the "HVDC" High Voltage Direct Current Transmission Systems and one of the essential components on this Transmission Systems, corresponds to the "Grounding Electrode", which has a different operating characteristic than the traditional Transmission of Electrical Energy, in alternating current (AC), and has two purposes, the first set reference to 0 volts, and the second is allow an alternative route of the current when certain equipment and facilities fail, increasing system reliability.

This work focuses on the Grounding Electrode, in particular the monopolar or bipolar configuration with ground return of an HVDC system, and identify the parameters and criteria taken as basic information, supported by technical specifications, international guides, technical articles and basic literature of HVDC systems, where the information needed to carry out an EPT design procedure will be obtained, which will provide engineers in charge of the former HVDC lines in Mexico, a document containing the steps necessary to carry out the design, supervision and maintenance of EPT.



ALCANCE

Seleccionar los criterios que servirán para el diseño o dimensionamiento del electrodo de puesta a tierra para sistemas HVDC, considerando la configuración propia de un sistema con retorno por tierra, tomando como base de diseño los siguientes estudios:

- Derechos de vía
- Modelo de resistividad
- Geológicos /Geofísicos
- Propiedades térmicas del suelo
- Impacto al medioambiente e infraestructura
- Normatividad internacional

El desarrollo de este documento contendrá la base para que ingenieros encargados de realizar el diseño, supervisión de ingeniería para las primeras líneas de transmisión en HVDC que se construirán en México, cuenten con un documentó de referencia general, para diseñar correctamente el tipo de electrodo, de acuerdo a las características o parámetros obtenidos de los estudios correspondientes, así como supervisar la operación del EPT.

ACRÓNIMOS

1. HVDC Alto voltaje de corriente directa (**H**igh **V**oltage **D**irect **C**urrent)
2. HVAC Alto voltaje de corriente alterna (**H**igh **V**oltage **A**lternating **C**urrent)
3. CA Corriente alterna
4. CD Corriente directa
5. GPR Elevación de Potencial en Tierra (**G**round **P**otential **R**ise)
6. EPT Electrodo de puesta a tierra
7. SPT Sistema de puesta tierra
8. MRS Resonancia Magnética



Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente México no cuenta con sistemas de transmisión en HVDC y con la creciente demanda de energía, será uno de los medios de transmisión más eficientes en un futuro cercano, por lo que esta tecnología está siendo analizada hoy en día por las compañías del sector eléctrico, como la CFE y las instituciones para el desarrollo energético, debido a que presenta mayor eficiencia en la transmisión eléctrica en alta tensión, comparado con los sistemas de CA. Los elementos principales de los sistemas HVDC son: 1) Subestaciones de CA, 2) estación rectificadora e inversora, 3) filtros, 4) línea de transmisión en CD, 5) electrodo de puesta a tierra "EPT", en esta tecnología el EPT es vital para su funcionamiento y tiene dos objetivos primordiales, 1) obtener una referencia a 0 volts para poder operar, y 2) proteger a los seres, cuando exista flujo de corriente de operación, falla a tierra, o descarga atmosférica, por lo que el EPT debe garantizar un camino de baja impedancia para evitar diferencias de potencial que pudieran causar daño.

En la actualidad a nivel internacional muchos países hacen uso de esta tecnología desde el siglo pasado. Europa y Asia son líderes en los sistemas HVDC, y en algunos países hacen uso de esta tecnología, pero a menor escala, ver Figura 1.2.

Hoy en día con los avances en la electrónica de potencia, permiten la evolución de las válvulas, contribuyendo el incremento de capacidad a las estaciones conversoras.

Fundamentado en lo anterior, este trabajo de tesis se enfoca de manera puntual en el electrodo de puesta a tierra, en particular a la configuración monopolar o bipolar con retorno por tierra de un sistema HVDC, identificando los parámetros y criterios que se deben considerar como información básica, apoyada por especificaciones técnicas, guías internacionales, artículos técnicos y literatura básica de sistemas HVDC, de donde se obtendrá la información necesaria para realizar un procedimiento de diseño para el EPT, que proporcionará a los ingenieros encargados de las primeras líneas HVDC en México, un documento que contenga los pasos necesarios para realizar el diseño, supervisión y mantenimiento de un EPT.

1.1 Antecedentes

La necesidad de transportar energía eléctrica desde un punto distante al punto de consumo, se empezó a dar desde la aparición de la bombilla de vacío en 1879 gracias a Thomas Alva Edison [1]. El primer sistema de transmisión eléctrica en el mundo se construyó basado en corriente directa (CD) ("Miesbach-Munich" Alemania, 2 kV y 50 km, en 1882); tenía componentes costosos y presentaba grandes pérdidas, por lo que, al inventarse el

transformador en 1885, se prefirió utilizar la transmisión en corriente alterna (CA) debido a que en esa época presentaba mejores condiciones técnicas y económicas, y la transmisión en corriente continua no fue la mejor opción [1], [2].

Sin embargo, durante la última mitad del siglo XX continuó desarrollándose la tecnología de la corriente directa, con la invención del diodo, el tubo de vacío y las válvulas de arco de mercurio (siglo XX), las cuales en los años 1950 hicieron posible la conversión de corriente alterna a continua, inclusive a niveles de alta tensión. En la Figura 1-1 se presenta de manera esquemática el desarrollo histórico de la tecnología de válvulas de estado sólido de corriente directa a partir de 1954 hasta la fecha [2].

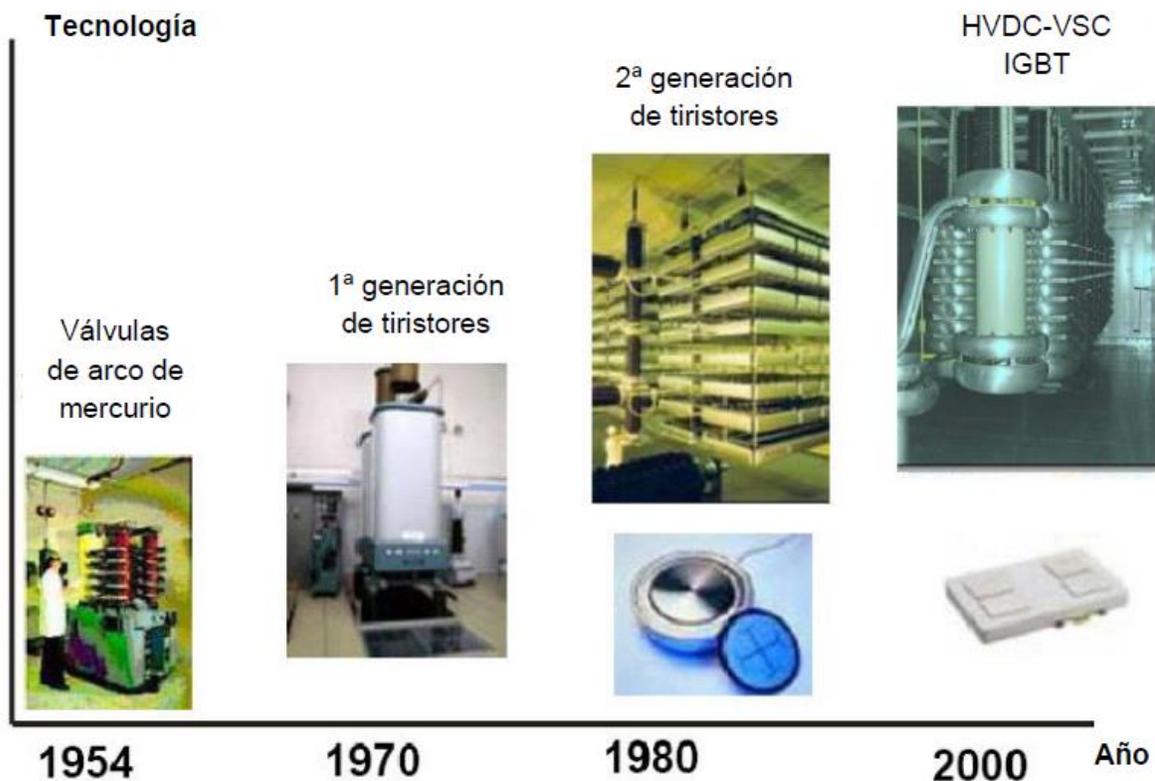


Figura 1-1- Evolución de la transmisión en corriente directa[1].

El primer sistema comercial en CD se construyó en 1954 y unió la isla de Gotland con Suecia (100 kV, 20 MW), con un cable submarino de 98 km. En 1967 se inició el uso de las válvulas de estado sólido (tiristores) en la transmisión en HVDC y se aplicaron nuevamente en el enlace Gotland-Suecia. En 1968 se usaron tiristores en el proyecto Cahora Bassa con la mayor tensión (533 kV), mayor potencia (1920 MW) y longitud (1420 km) hasta esa fecha [2].

En el año de 2004, la capacidad instalada en el mundo utilizando la tecnología de HVDC ascendía a más de 70 GW. El mayor enlace construido es de Itaipú en Brasil (6,3 GW, 1985); en la Figura 1.2 se muestran algunos proyectos realizados por la compañía Siemens®, información extraída de su página [2].

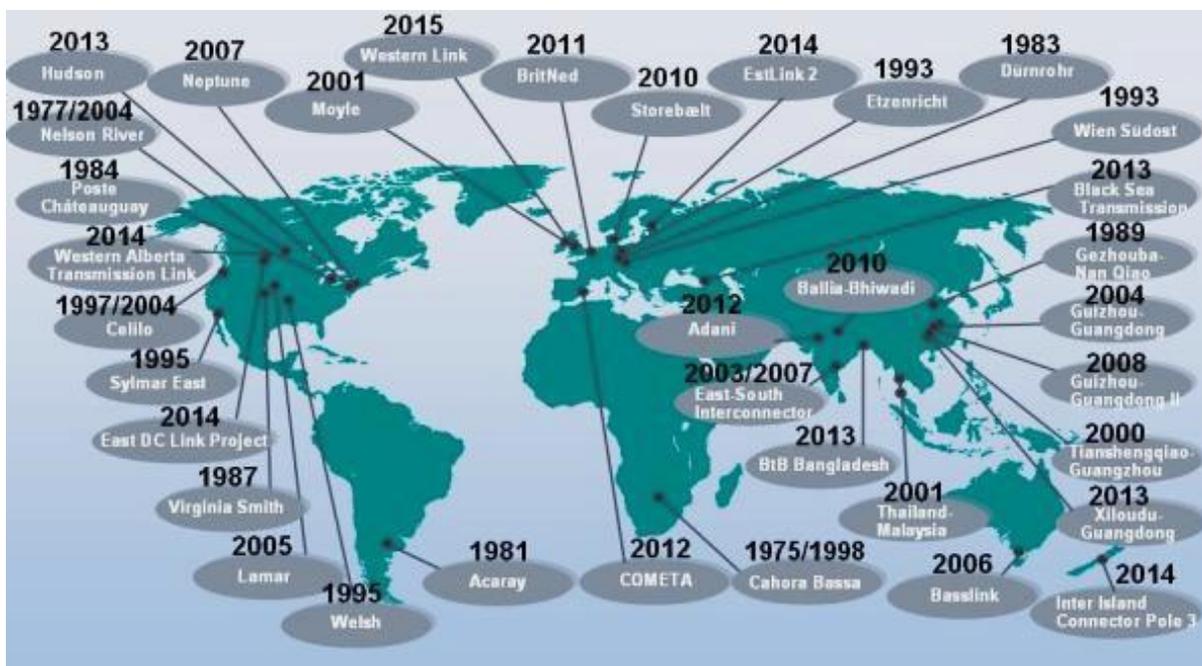


Figura 1-2.- Proyectos presentes y futuros de HVDC planteados o realizados por siemens [2].

1.2 Normatividad

La normatividad aplicable a los enlaces o sistemas en HVDC está concentrada en los siguientes documentos:

1.2.1 IEC 61975 (2010)

High Voltage Direct-current (HVDC) installations – System tests, “Instalaciones de alta tensión en corriente directa – Prueba de sistemas” [5]

Esta norma internacional se aplica a las pruebas de sistemas HVDC que consisten en una terminal emisora y una terminal receptora, cada una conectada a un sistema AC. Las pruebas especificadas en esta norma se basan en arreglos tanto monopolar bidireccional como bipolar, que consisten en una terminal emisora y una terminal de recepción, cada una conectada a un sistema de CA. Para instalaciones “bac-to-back” los requisitos de prueba y los criterios de aceptación deben ser acordados, mientras que los sistemas multi-terminal y los convertidores con tecnología VSC no están incluidos en esta norma.

Las pruebas recomendadas en esta norma son para: Equipo de estación HVDC y Línea CD / cable / bus incluyendo electrodo de tierra, si existe; Equipo de control y protección HVDC y sus configuraciones; Consideraciones ambientales; Interacción de los sistemas AC/DC; La operación del sistema cuando se opera junto con un sistema de CA conectado.



1.2.2 IEC/TS 62344 (2013)

Design of earth electrode stations for high-voltage direct-current (HVDC) links – general guidelines. “Diseño de las estaciones de puesta a tierra para enlaces de alta tensión de corriente directa HVDC – guías generales” [6].

Esta especificación técnica se aplica al diseño de estaciones del electrodo de tierra para líneas de HVDC. Proporciona los criterios, límites y precauciones que deben aplicarse durante el diseño de los electrodos de tierra para garantizar la seguridad del personal y de los electrodos, y evitar cualquier impacto significativo que puedan ejercer en sistemas de transmisión de CD, CA y el entorno circundante.

1.2.3 IEC TR 60919-1 (2017)

Performance of high voltage current (HVDC) systems with line-commuted converters – Part 1: Steady-state conditions.

“Operación de sistemas con convertidores de línea conmutada de enlaces de alta tensión en corriente directa HVDC – Parte 1: Condiciones en estado estable” [7].

Esta parte 1 de la IEC proporciona una guía general sobre los requerimientos de los sistemas HVDC en estado estable, el comportamiento de dos terminales que utilizan unidades de conversión de 12 pulsos formadas por conexiones de puente trifásico (doble vía), pero no cubre los sistemas de HVDC multiterminal.

1.2.4 IEC 60919-2 (2008)

Performance of high voltage current (HVDC) systems with line-commuted converters – Part 2: Faults and switching.

“Operación de sistemas con convertidores de línea conmutada de enlaces de alta tensión en corriente directa HVDC – Parte 2: Fallas y estado transitorio” [8].

Esta parte 2 de la IEC proporciona una guía general sobre los requerimientos de los sistemas HVDC en falla y estado transitorio de dos terminales que utilizan unidades de conversión de 12 pulsos formadas por conexiones de puente trifásico (doble vía), pero no cubre los sistemas de HVDC multiterminal. Sin embargo, se discuten ciertos aspectos de convertidores en paralelo y líneas en paralelo, para un sistema de dos terminales.

1.2.5 IEC 60919-3 (2008)

Performance of high voltage current (HVDC) systems with line-commuted converters – Part 3: Dynamic conditions [9].



“Operación de sistemas con convertidores de línea conmutada de enlaces de alta tensión en corriente directa HVDC – Parte 3: Condiciones dinámicas”.

Esta parte 3 de la IEC proporciona una guía general sobre los requerimientos de los sistemas HVDC en condiciones dinámicas, que incluye todos los eventos y fenómenos cuya frecuencia característica o dominio del tiempo incluye el estado estable y el estado transitorio. Define el comportamiento dinámico de los sistemas HVDC de dos terminales que utilizan unidades de conversión de 12 pulsos formadas por conexiones de puente trifásico (doble vía).

1.3 Objetivo general

Obtener un procedimiento de diseño del electrodo de puesta a tierra, para una configuración con retorno por tierra de sistemas HVDC, identificando las etapas y lineamientos generales involucrados, con el fin de obtener los criterios necesarios para su diseño.

1.3.1 Objetivos específicos

1. Definir los tipos de configuraciones en sistemas HVDC con retorno por tierra y sus fundamentos teóricos.
2. Documentar tipos de electrodos, selección de sitio y dimensionamiento del electrodo de puesta a tierra de acuerdo a las características del suelo obtenidas en los estudios previos.
3. Elaborar un procedimiento de diseño para el electrodo de puesta a tierra de sistemas de transmisión en HVDC.
4. Establecer las medidas de mitigación después de la instalación, validando los parámetros obtenidos en la puesta en servicio.

1.4 Hipótesis

Con un procedimiento de diseño que contemple los lineamientos necesarios para el dimensionamiento adecuado del electrodo de puesta a tierra de un sistema HVDC, garantizará un camino de baja impedancia para la operación, confiabilidad y seguridad del sistema HVDC.

1.5 Justificación

Proporcionar a ingenieros un documento de referencia, que contenga los pasos necesarios para realizar el diseño, supervisión y mantenimiento de un EPT, para los primeros sistemas HVDC que se construirán en México.

1.6 Impacto social y medio ambiente

Los efectos medioambientales de la transmisión en CD, se caracterizan principalmente por los efectos corona e iónico, que puede producir interferencias radiofónicas, ruido y generación de ozono, a bajo nivel. En el campo eléctrico aparece tanto la carga eléctrica de los conductores, como en el caso de las líneas aéreas, las cargas del aire ionizado alrededor del conductor, lo que da lugar a campos eléctricos continuos y estáticos en el derecho de vía o bajo las líneas de transmisión, aunque no se tiene evidencia de efectos nocivos y es de magnitud semejante al campo eléctrico bajo nubes de tormenta.

Por otra parte, la CD que circula produce también un campo magnético continuo y estático a orillas del derecho de vía, que tiene un valor semejante al del campo magnético terrestre, siendo inocuo para la salud humana, aunque puede originar interferencias en el funcionamiento de brújulas o aparatos sensibles cercanos a la línea. El campo magnético se puede eliminar cuando se opera la línea en modo bipolar y en conexiones con retorno por tierra, utilizando un retorno metálico.

Estos inconvenientes son menores en las líneas de CD que en las de CA, lo que las hace más favorables. Se mejora la capacidad de transporte y sufre menos pérdidas, contribuyendo al uso más eficiente de las centrales eléctricas existentes. El impacto visual y el uso del terreno es menor en las líneas de CD, así como el costo por derechos de vía (Figura 1-3).

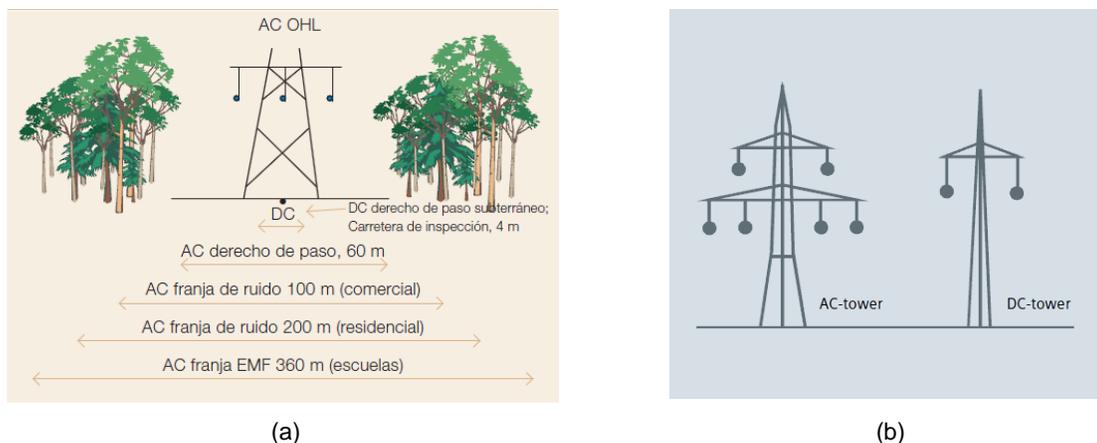


Figura 1-3.- a) Comparación entre las necesidades de espacio HVDC-VSC subterránea y HVAC aérea. b) Estructuras de alta tensión en CA y en CC (para transmisión de 1000 MW) [3].



En lo referente a las instalaciones de las estaciones de conversión, se pueden tener en cuenta los siguientes aspectos: ruido audible, impacto visual y compatibilidad electromagnética, aspectos que se pueden atenuar con un diseño adecuado [4].

1.7 Estructura del documento

En esta sección se describe el contenido de los capítulos de acuerdo a los objetivos trazados para el trabajo de tesis:

En el **Capítulo 1**, proporciona un panorama general con una breve introducción, normatividad existente, se describen los objetivos, hipótesis, justificación, impacto social y una breve descripción de los capítulos que se abordaran durante el desarrollo del trabajo.

En el **Capítulo 2**, se analizó la información de las diferentes configuraciones existentes de los sistemas HVDC, para obtener una perspectiva objetiva de las que utilizan un EPT como medio retorno de corriente y obtener la referencia a “0 volts” para su funcionalidad.

El Capítulo 3, describe y documenta los tipos de EPT, así como la evaluación de los parámetros eléctricos del suelo para seleccionar la mejor característica eléctrica del sitio, de acuerdo a los parámetros obtenidos de los estudios correspondientes.

El Capítulo 4, describe las consideraciones de diseño, los materiales del electrodo y se analiza el impacto ambiental causado en el sitio seleccionado.

En el Capítulo 5, toma como base la información obtenida los capítulos 3, 4 y 5 para desarrolla un procedimiento de diseño, que contenga los lineamientos necesarios que se deben cumplir para el funcionamiento adecuado del EPT conectado al sistema HVDC.

El Capítulo 6, describe la validación que se deberá realizar después de la puesta en operación del EPT, analizando las desviaciones y la afectación a estructuras cercanas, flora, fauna, para tomar las medidas de mitigación correspondientes.

Como ultimas secciones del documento, se incluyen las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros y como sección final se presentan las referencias utilizadas para la realización de este trabajo de tesis.

Capítulo 2. SISTEMAS HVDC

2.1 Introducción

Un sistema de transmisión HVDC se explica básicamente del siguiente modo: La red en CA alimenta el convertidor que opera como rectificador, previo ajuste de la tensión en un transformador. La salida del rectificador es ya energía en CD independiente de la frecuencia y fase de la red de CA. Esta energía se transmite por la red de CD, aérea, subterránea o submarina, hasta otro convertidor que opera como inversor, y permite a la energía fluir de nuevo por la red de CA del receptor, ver Figura 2.1[10].

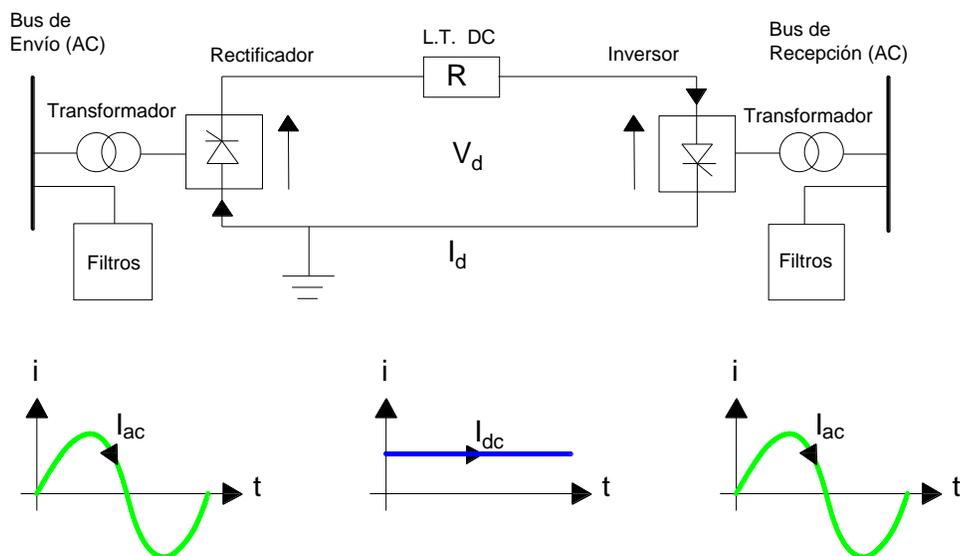


Figura 2.1 Esquema básico de transmisión HVDC

Actualmente, la mayoría de la energía eléctrica se transporta mediante CA clásica, ya que es más sencillo transformar el nivel de tensión. Las limitaciones ambientales jugarán un papel importante en el desarrollo de estos sistemas eléctricos de potencia, en las zonas rurales o para salvar grandes distancias sin obstáculos, suelen utilizarse tendidos aéreos mientras que para zonas urbanas y lugares donde la legislación medioambiental lo requiere, son adecuados los cables de alimentación subterráneos.

Las características y algunos componentes de las líneas son comunes y por lo tanto merece la pena realizar previamente una descripción general de la tecnología clásica, en la que se han basado la mayoría de las líneas HVDC hasta el momento.

Del mismo modo es oportuno analizar qué ventajas aporta el transporte en CD, para justificar su uso frente al transmisión en CA.



Los sistemas de transmisión en alta tensión HVDC se utilizan principalmente cuando se tienen las siguientes necesidades [10], [11].

- Transmitir energía con cables aéreos a grandes distancias.
- Transmitir energía con cables subterráneos o submarinos a grandes distancias.
- Conectar dos redes asíncronas.
- Reducir las corrientes de falla.
- Derivar redes congestionadas.
- Disponer de una transferencia de potencia mejor controlada.
- Los espacios físicos para la transmisión están muy limitados (derecho de vía).
- Reducir efectos ambientales

Debido al notable incremento en la potencia y confiabilidad de los convertidores de potencia AC/DC, la transmisión de energía en alta tensión en corriente directa se ha incrementado en forma importante a nivel mundial. Actualmente, las tensiones utilizadas para la transmisión aérea están en el rango de ± 500 a ± 800 kV, con corrientes nominales de 1 a 4 kA [12].

Para su operación es necesario un sistema conectado a tierra, mediante electrodos convenientemente diseñados, que presentan una característica de operación muy diferente a la presentada en la tradicional transmisión de energía eléctrica en corriente alterna, y también con mayores problemas que resolver [12].

Hoy en día, el uso del suelo como trayectoria de retorno representa un alto compromiso con el medio ambiente, por lo que es necesario diseñar y definir las mejores prácticas para mejorar el rendimiento, costo e impacto ambiental de los electrodos de puesta tierra [12].

Un arreglo con retorno metálico representa una alternativa para no utilizar el suelo como trayectoria de retorno de la corriente. Sin embargo, su aplicación no puede ser de forma general, sino que deben tomarse en cuenta diferentes factores. Se considera que, en general, el modo retorno por tierra/mar es menos costoso y tiene menos pérdidas que el modo retorno metálico [13]. Finalmente, la decisión de implementar un sistema en HVDC involucra un análisis económico, donde debe considerarse la inversión directa (costos de las líneas de transmisión, las estaciones convertidoras, la tecnología de los equipos, las pérdidas asociadas a un determinado período de tiempo), además de los costos de mantenimiento y operación [14].

Las estaciones convertidoras son más costosas que las subestaciones AC tradicionales. Esto se debe principalmente a los equipos que las subestaciones convertidoras necesitan para el funcionamiento del sistema. La Figura 2.2 muestra un gráfico típico de los costos versus la distancia entre los sistemas de transmisión en corriente alterna y continua para un mismo nivel de potencia mayor o igual que 1,000 [MW] [11]. A una distancia de 0 [km] se tienen los costos

de las subestaciones de ambos tipos de sistemas, y el aumento se comienza a producir producto del costo de la línea aérea de transmisión.

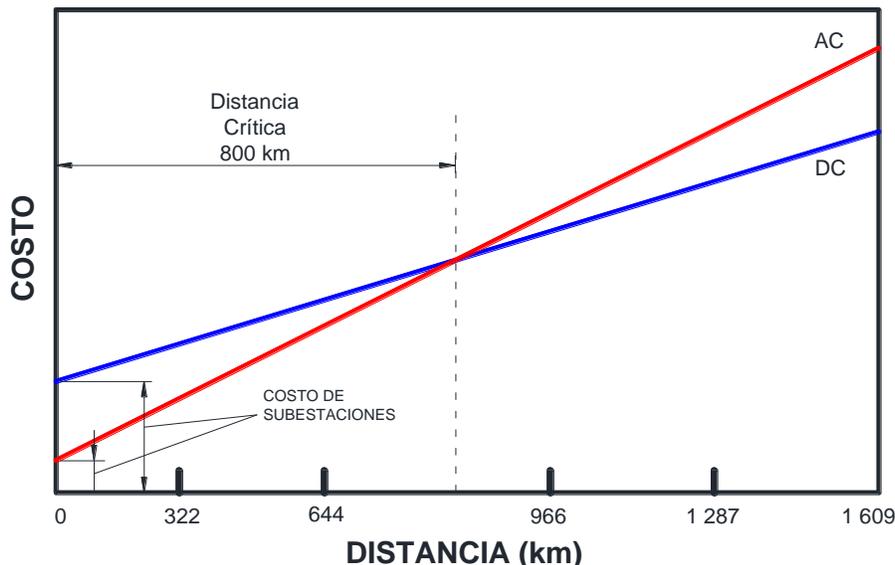


Figura 2.2 Gráfica Costo - Distancia [14].

La Figura 2.3 muestra tres trazos de longitud de línea (750; 1,500 y 3,000 km) y las curvas del costo para diferentes tensiones en cada una de ellas. A partir de cada frontera puede identificarse el costo óptimo para cada cambio de tensión. Por ejemplo, para una longitud de 1,500 km y potencia por debajo de los 3,500 MW, la tensión de ± 600 kV resulta ser la más económica, mientras que para potencias mayores la tensión de ± 800 kV resulta ser la más económica. La Tabla 2.1 condensa estas zonas de frontera [14].

Tabla 2.1 Tensión óptima en función de la potencia de la estación convertidora y la longitud de la línea de transmisión de CD

Tensión (kV)	Para 750 km	Para 1,000 km	Para 3,000 km
± 300	< 1,550 MW	< 1,100 MW	< 850 MW
± 500	1,550 – 3,050 MW	1,100 – 2,200 MW	850 – 1,800 MW
± 600	3,050 – 4,500 MW	2,200 – 3,400 MW	1,800 – 2,500 MW
± 800	> 4,500 MW	> 3,400 MW	> 2,500 MW

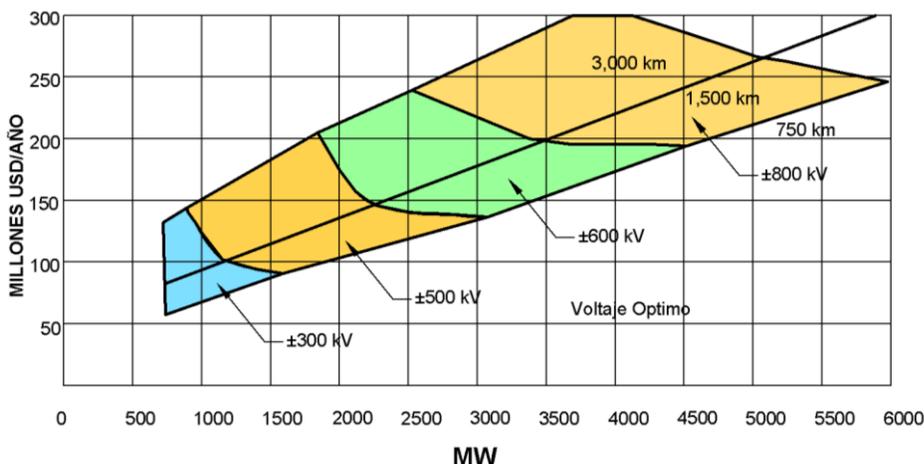


Figura 2.3 Tensión óptima en función de la potencia de la estación convertidora y la longitud de la línea de transmisión de CD [14].

2.2 Configuraciones de un Sistema HVDC

Las configuraciones básicas de los sistemas HVDC incluyen sistemas back-to-back, bipolar, monopolar y multi-terminal.

La configuración de un esquema HVDC determina el camino de la corriente en operación normal y contingencia, y si la operación de retorno a tierra puede ocurrir.

Las estaciones convertidoras pueden usar convertidor de línea conmutada (LCC con tiristores) o convertidor de fuente de voltaje (VSC usando IGBT) [13].

Existen dos arreglos básicos con retorno por tierra para los enlaces de HVDC [12] que son:

1. Monopolar (más simple. Figura 2.4).
2. Bipolar (más flexible y confiable. Figura 2.5).

2.2.1 Monopolar

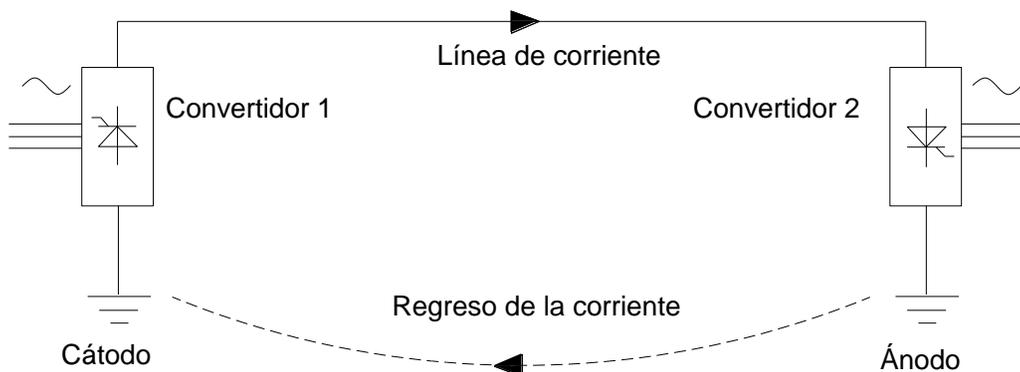


Figura 2.4 Arreglo Monopolar

Características generales:

Ventajas:

- Configuración simple.
- Utiliza sólo dos convertidores AC/DC y la línea de enlace.
- Ventajas (uso de menos infraestructura):
- El retorno de la corriente se realiza por mar o tierra.
- Utiliza un solo conductor para la transmisión de energía en CD.

Desventajas:

- Pérdida de la transmisión cuando se pierde el enlace.
- Operación continua de los electrodos para el retorno por tierra/mar.
- Lidar con los efectos de la circulación de corriente en el suelo/mar (corrosión, contaminación, seguridad eléctrica).

2.2.2 Bipolar

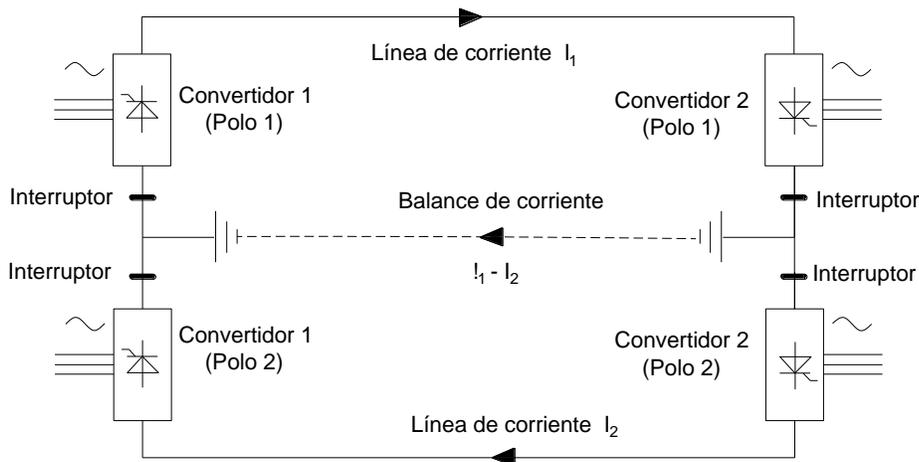


Figura 2.5 Arreglo Bipolar

Características generales [15]:

- Utiliza cuatro convertidores AC/DC, dos en cada extremo, todos de igual tamaño.
- Puede considerarse como la combinación de dos arreglos monoplares con retorno por tierra/mar.
- Retorno por tierra/mar ante una contingencia (pérdida de un convertidor o enlace).
Figura 2.6.

Ventajas:

- Corriente casi cero en el suelo en operación normal (1-2% de corriente nominal), debido al balance de la corriente (misma intensidad y polaridad opuesta).
- Capacidad de operación al 50% ante la falla de un convertidor o enlace.
- Pasar a modo "retorno metálico" mediante el uso del enlace fallado (coordinación de interruptores) Figura 2.7.
- Incremento de la vida útil del electrodo de tierra debido a menor circulación de corrientes en tierra/mar.

Desventajas:

- Dado que los conductores de potencia deben estar aislados para la tensión de transmisión, el costo de la línea de transmisión es más alto que un arreglo monopolar con un conductor de retorno.
- Se duplica el porcentaje de pérdidas en la línea.
- Doble rango de TAP requerido en el transformador de potencia debido a la caída de tensión, elevando su costo.

- Necesidad de reducir potencia transmitida para un costo determinado.
- Puede tenerse una confiabilidad reducida debido al uso de dos conductores expuestos en la transmisión y debido a interrupciones asociadas con las operaciones de la protección en el convertidor aislado de tierra.

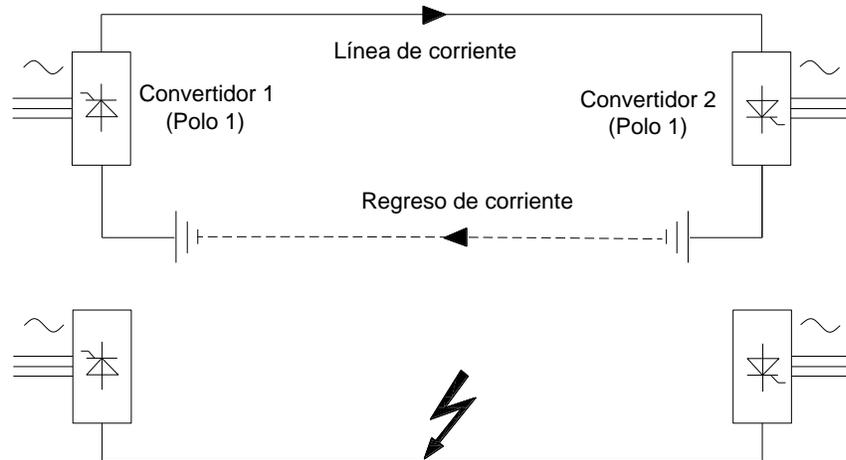


Figura 2.6 Falla en arreglo Bipolar. Retorno por tierra/mar

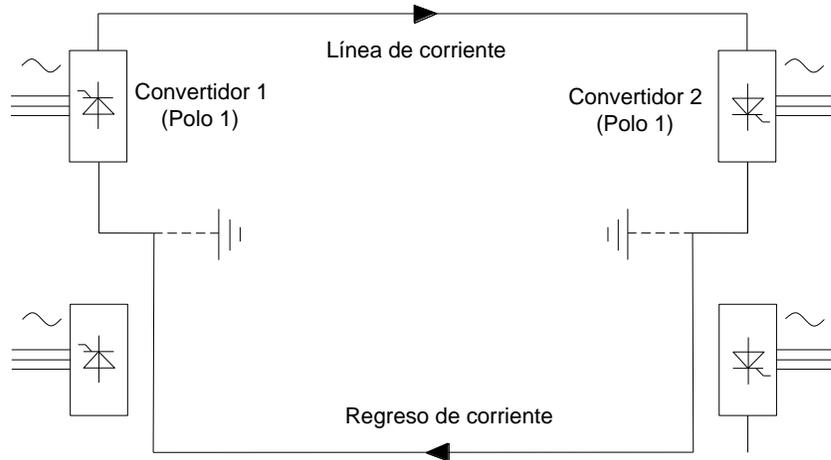


Figura 2.7 Falla en arreglo Bipolar. Retorno metálico

Nota: En las Figura 2.4 a Figura 2.7, el símbolo del convertidor corresponde a uno con línea conmutada con tiristores (Line Commutated Converter LCC), pero también aplica para un convertidor de fuente de tensión (Voltage Sourced Converter VSC) [13].

La operación con el arreglo de la Figura 2.4 debe ser por tiempo limitado, debido a las consecuencias de la circulación de la corriente por tierra/mar, pudiendo generar la salida del sistema HVDC cuando el límite de tiempo es excedido [12], [16]. La Figura 2.7 corresponde también a un arreglo monopolar con retorno metálico. Este arreglo es utilizado cuando el regreso por tierra/mar llega a ser muy problemático (áreas muy pobladas, cruzamiento con grandes extensiones de agua o áreas de alta resistividad) [12],[4].



Capítulo 3. ELECTRODO Y SELECCIÓN DE SITIO

3.1 Introducción

Los electrodos de puesta a tierra en un sistema HVDC son la conexión física al suelo de la “corriente a tierra”, que es un término que refiere a las corrientes que circulan entre ambas estaciones convertidoras a través de la tierra, ver Figura 2.4.

Los sistemas HVDC utilizan el electrodo con dos propósitos, el primero es el de fijar el punto “0 volts”, para proteger a las personas y equipos de la estación convertidora, y el segundo es permitir una ruta alternativa de la corriente cuando ciertos equipos e instalaciones fallen, aumentando la confiabilidad del sistema.

Para las distintas configuraciones de sistemas HVDC mostradas anteriormente, es necesario un camino de retorno para la corriente cuando el sistema deje de funcionar correctamente o se haga algún tipo de maniobra. Una excepción a esto ocurre para el caso del sistema monopolar, que ante una falla, el sistema deja de funcionar completamente y no existe transmisión de energía. Para todas las otras configuraciones, los electrodos de ambas subestaciones funcionarán en su máxima capacidad cuando uno de los polos del sistema deje de operar.

3.2 Tipos de Electrodo

En un arreglo donde el sistema HVDC nunca opere en modo retorno por tierra/mar, podría pensarse que el EPT puede omitirse, sin embargo, aún en esta condición, el electrodo es necesario implementarse para fijar el potencial a cero del sistema. En este caso el diseño del electrodo es simple, ya que la corriente que circula por él es casi cero.

Sin embargo, si el electrodo es utilizado en modo retorno por tierra/mar, debe ubicarse a una cierta distancia de la estación convertidora, ya que la corriente de CD que fluye en tierra/mar puede saturar magnéticamente los núcleos de los devanados del transformador en arreglo estrella conectada a tierra. Esta condición requiere disponer de grandes extensiones de terreno y numerosos estudios, como se verá con detalle en este trabajo de tesis.

3.2.1 Electrodo Terrestres

3.2.1.1 Electrodo horizontales

Los electrodos terrestres se clasifican en tres tipos según la profundidad del sistema y las

configuraciones que se describen a continuación.

Electrodos horizontales poco profundos, generalmente enterrados en la superficie en zanjas con lechos de intensificador de puesta a tierra (coque), como se muestra en la Figura 3.1. Este tipo de electrodo se puede configurar en muchas formas geométricas, incluidos los electrodos lineales (Figura 3.2), electrodos de anillo único (Figura 3.3), electrodos de doble anillo, electrodos de anillo triple y electrodos elípticos o cualquier otra forma según lo dicten las limitaciones del sitio.

Los tipos de electrodos poco profundos tienen ventajas económicas en su construcción. Se prefiere una configuración de anillo circular debido a la distribución uniforme de la corriente, pero también se pueden construir electrodos lineales o de forma irregular. Un electrodo lineal puede ramificarse para ajustarse al sitio y usar el área del sitio de una manera óptima. Los electrodos lineales y ramificados requieren el uso de un mayor volumen de intensificador y también un tamaño de elemento metálico más grande en los extremos externos debido a una mayor densidad de corriente.

Los electrodos horizontales concéntricos circulares o de forma irregular a veces se aplican cuando el costo del suelo es alto y su adquisición es difícil.

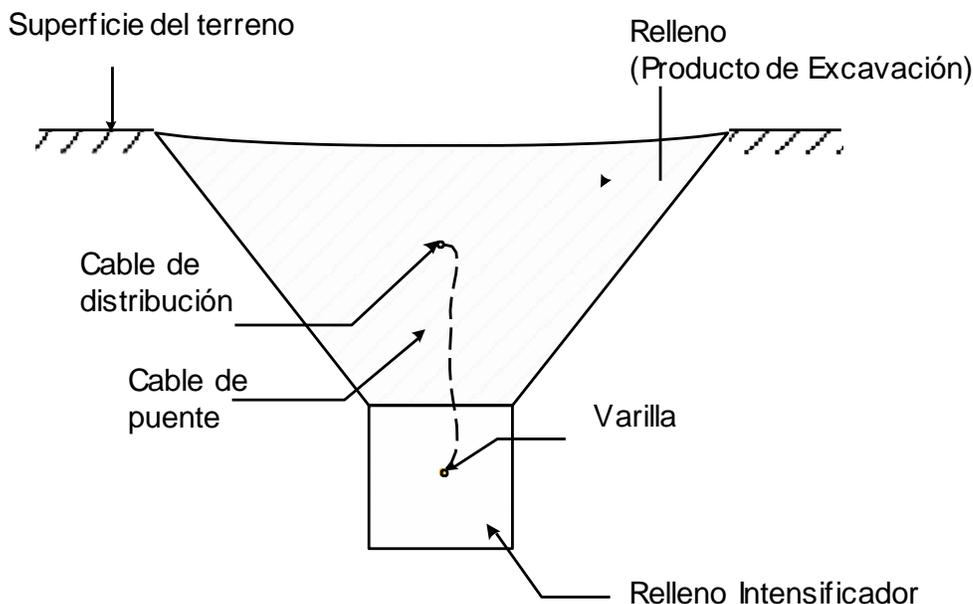


Figura 3.1 Electrodo Horizontal (a)

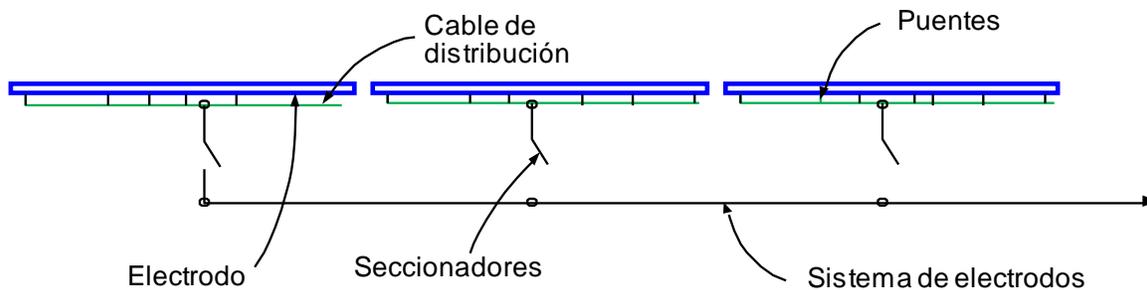


Figura 3.2 Electrodo Horizontal (b)

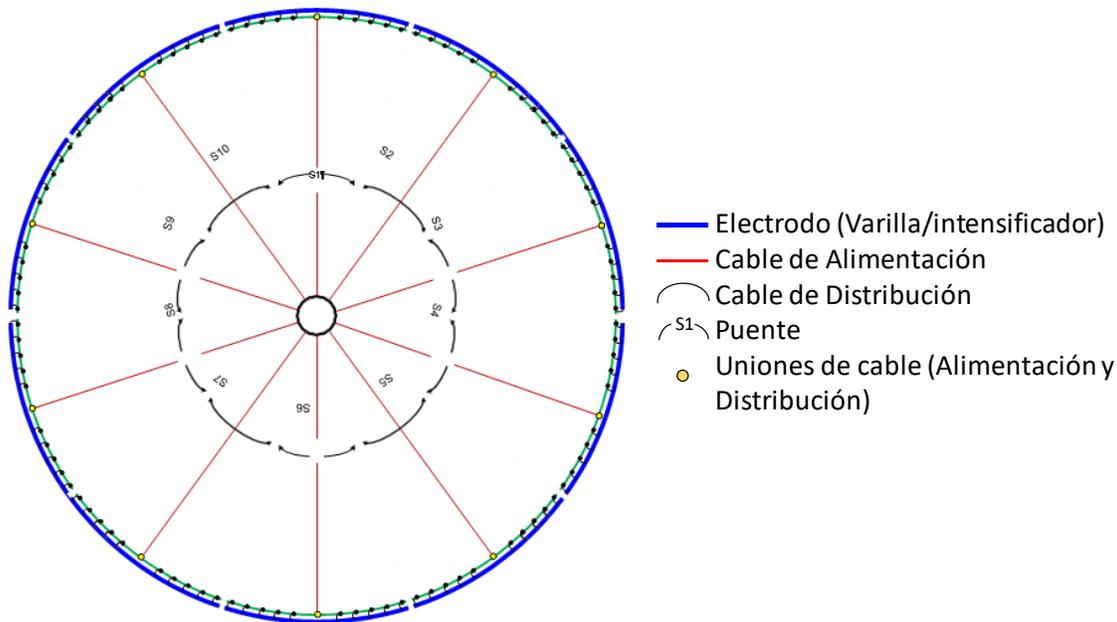


Figura 3.3 Electrodo Horizontal (c)

3.2.1.2 Electrodo verticales

Este tipo de electrodos tiene algunas ventajas, especialmente donde el suelo no permite la instalación de electrodos superficiales. La parte activa de los electrodos verticales estaría en los volúmenes de agua a profundidades localizadas o en una capa determinada del suelo con humedad relativamente alta.

Se han utilizado hasta profundidades de 200 m para alcanzar una capa de resistividad más baja y mayor contenido de humedad que la que se encuentra cerca de la superficie [13], y para disminuir el riesgo de interferencia en el área del sitio como se muestra en la Figura 3.4.

Al igual que con los electrodos poco profundos, los elementos verticales se pueden organizar en muchos patrones geométricos, como lineal, circular, rectangular y cuadrado. Los agujeros del electrodo normalmente se rellenan con intensificador.

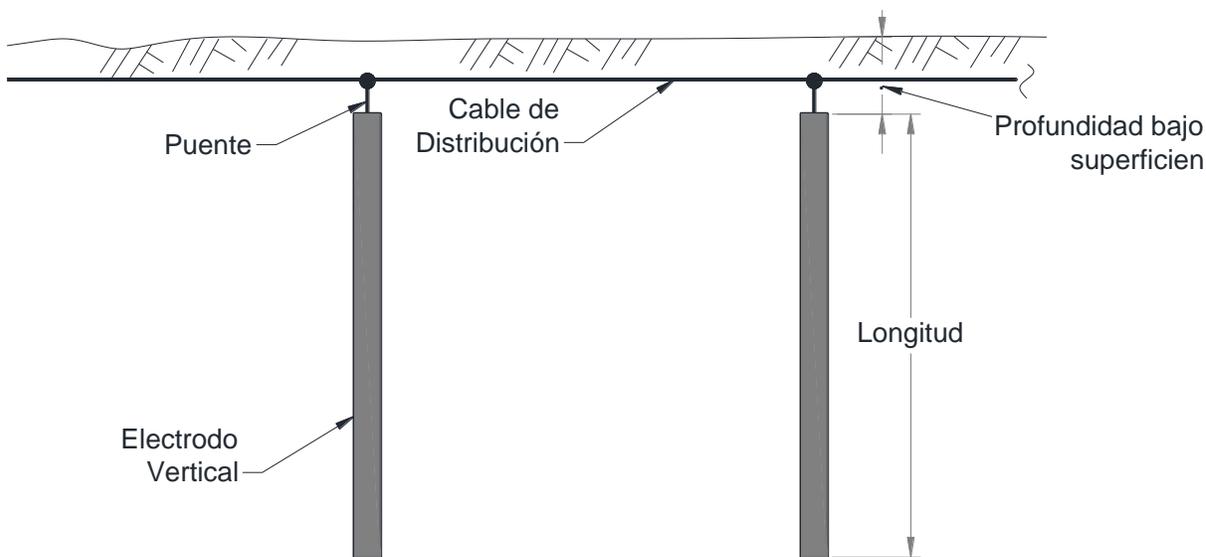


Figura 3.4 Electrodo Vertical

En general, un electrodo vertical genera menores gradientes de potencial sobre la superficie del suelo en comparación con electrodos horizontales superficiales para una misma longitud, especialmente en aquellos puntos localizados de alta humedad o contenido de agua del suelo, el único inconveniente podría ser el costo.

3.2.1.3 Electrodo de pozo profundo

Este tipo de electrodo se utiliza cuando la primera capa del suelo tiene una alta resistividad y el estudio geológico determina resistividades más bajas en capas con mayor profundidad. Con la tecnología de perforación actual, la profundidad del pozo podría extenderse hasta aproximadamente 1000 m. La baja resistividad de las capas profundas del suelo promueve la rápida dispersión de la corriente a gran profundidad y ayudaría a reducir el potencial eléctrico y los gradientes en la superficie. Esto puede reducir el riesgo de corrosión debido al intercambio de corriente entre el suelo y las instalaciones enterradas.

Típicamente, se conectan de 3 a 5 electrodos de pozo profundo en paralelo dispuestos en configuración lineal o poligonal. Los pozos individuales pueden tener más de 1000 m de profundidad y pueden transportar hasta 1000 A [13].

El arreglo de los electrodos en una forma poligonal puede ayudar a reducir la corriente de desequilibrio entre los electrodos profundos, pero el efecto puede reducirse si la resistividad del suelo no es similar para cada electrodo. La Figura 3.5 muestra una disposición de electrodos de pozo profundo con una profundidad de 1000 m con pozos espaciados a 100 m

de distancia. Los cables de conexión se utilizan para distribuir la corriente a los elementos del electrodo metálico a diferentes profundidades en el pozo.

El intensificador se utiliza para proporcionar la interfaz eléctrica entre los elementos metálicos y el suelo, reduciendo así la corrosión de los elementos metálicos y reduciendo la densidad de corriente en la interfaz electrodo-suelo. El gas producido por calor o electrólisis puede bloquear la corriente que fluye a través del coque y necesita ser ventilado usando una tubería perforada que recorre toda la longitud del electrodo.

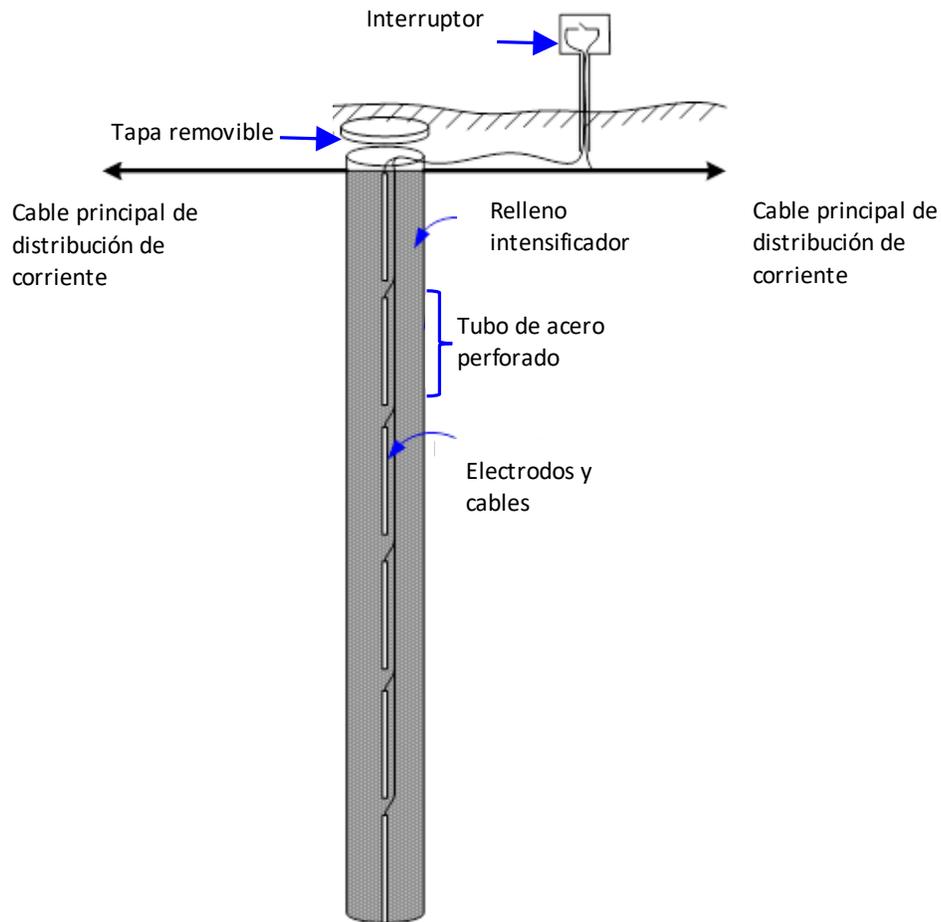


Figura 3.5 Electrodo pozo profundo

3.2.2 Electrodos de Costa

Son electrodos que se desarrollan, como bien dice su nombre, en la costa marina, por lo que están cercanos a la playa y por lo tanto en agua salada/dulce.

Los electrodos de playa se entierran bajo el límite costero, donde se encuentra agua saturada (salada y/o dulce), por lo que se tiene una baja resistividad en el terreno y, por lo tanto, la



corriente fluye fácilmente al mar. Estos electrodos se pueden disponer de forma horizontal o vertical.

3.2.3 Electrodos Marinos

A diferencia de los electrodos de costa, estos electrodos se desarrollan en el fondo marino y en el interior del mar, a distancias de más de 100 m de la orilla del mar. Las profundidades en el lugar en que se dispone el electrodo pueden variar entre 5 m y 30 m.

La ventaja de los electrodos de costa o marinos es que la resistividad del suelo no exhibe las variaciones típicas encontradas en el suelo fuera de costa.

Estos electrodos quedan protegidos generalmente por bloques de cemento o piedras para aislarlos de los animales marinos, anclas, buzos, etc.

3.3 Selección del sitio

El primer paso recomendado para la selección del sitio de instalación del EPT es realizar un estudio de sitios “no aptos”, es decir, identificar todos aquellos sitios que, de entrada y sin mucho estudio, ofrezcan condiciones desfavorables, tomando en consideración aspectos ambientales y sociales, como la disponibilidad del suelo para los derechos de vía de las líneas, el alto costo de la construcción del electrodo o el alto impacto ambiental de su construcción. Las herramientas de información geoespaciales y los sistemas de información geográfica son muy útiles en este proceso.

La información de asentamientos humanos y la información sobre el uso de la tierra, cobertura del suelo, áreas protegidas, áreas ambientalmente sensibles, etc. puede obtenerse de fuentes autorizadas como organizaciones gubernamentales, asociaciones profesionales.

Los criterios para identificar los sitios “no aptos” pueden basarse en requisitos técnicos, información real y algunas consideraciones preliminares (en caso de no conocer en forma detallada la ubicación de la estación convertidora, por ejemplo). Los criterios deben incluir:

1. Zonas que son ambientalmente sensibles, como el hábitat o el área de anidación de especies raras o en peligro de extinción.
2. Zonas alrededor de otra infraestructura eléctrica, de telecomunicaciones o de tuberías.
3. Zonas alrededor de los sitios de la estación convertidora. La estación del electrodo no debe ubicarse muy cerca de las estaciones del convertidor para evitar la corrosión de las estructuras enterradas en la estación y para asegurar que no ocurra la saturación de los transformadores con conexión a tierra. La distancia de separación requerida



se puede estimar inicialmente utilizando criterios generales, pero si el sitio se está considerando seriamente, debe determinarse con mayor precisión.

Factores que excluirían un sitio en particular como asentamientos humanos, áreas cultural o arqueológicamente sensibles, áreas agrícolas altamente productivas, áreas industriales, ríos, minas, áreas urbanas, carreteras principales, puentes y muelles.

Limitaciones en la distancia máxima al sitio del electrodo. Por ejemplo, dependiendo de factores técnico-económicos, puede ser necesario limitar la longitud de la línea de enlace a una distancia máxima de la estación. Se supone que los costos acumulativos de la línea de enlace serán más prohibitivos cuanto más lejos esté el sitio del electrodo de la estación convertidora. Las zonas “no aptas” de los electrodos de mar podrían incluir áreas de pesca importantes, granjas de peces, puertos, playas y otros centros turísticos, rutas de navegación, etc.

El concepto de zona “no apta” debe también aplicarse a áreas con posibles recursos minerales, pero aún no explotados, campos de petróleo o gas, depósitos de agua dulce, áreas para parques eólicos, áreas que están sujetas a inundaciones u otros peligros ambientales, etc.

Se recomienda que la selección del sitio del electrodo se realice al mismo tiempo que el diseño del tipo y material del electrodo.

3.4 Selección del tipo de electrodo

La selección del tipo de electrodo representa una etapa clave para el diseño del electrodo de tierra cuando se tiene un retorno por tierra/mar. La toma de decisión debe estar basada en aspectos técnicos y económicos, ya que debe cumplir con los requerimientos mínimos de: (a) seguridad, (b) confiabilidad, (c) viabilidad-factibilidad y (d) mínimo impacto ecológico-ambiental [13].

El diseño debe considerar los siguientes factores:

1. La distancia entre la estación del convertidor y el sitio potencial del electrodo.
2. La resistividad del suelo predominante en la proximidad de la estación convertidora.
3. Aspectos de operación del electrodo.
4. Limitaciones en la duración operativa del electrodo.
5. Filosofía de operación y mantenimiento.
6. Costo esperado.
7. Posibles limitaciones en el uso del suelo.
8. Seguridad en el sitio del electrodo.
9. Infraestructura que pudiera verse afectada.



En la actualidad, existen en el mundo tres tipos distintos de electrodos, clasificados por el lugar de instalación, que son electrodos terrestres, los de costa y los marinos.

No necesariamente los dos electrodos de las estaciones convertidoras (inversoras y rectificadoras) deben ser del mismo tipo, y más aún, ni siquiera iguales. El uso de uno o de otro quedará determinado principalmente por las características del suelo y la ubicación de las estaciones.

El electrodo más usado es el tipo anillo, ya que presenta una densidad de corriente homogénea en todo su entorno, lo que produce un gasto parejo del material. No ocurre lo mismo con electrodos de otras configuraciones que usen barras, ya que éstas tienen una densidad de corriente mayor en sus extremos por lo que se produce una mayor pérdida de material en esos puntos.

3.5 Propiedades básicas del electrodo

3.5.1 Resistividad del suelo

La resistividad del suelo es la propiedad eléctrica más importante para seleccionar el sitio del electrodo, ya que es un elemento que conduce corriente y la combinación de ambos valores determinan los gradientes de potencial en la superficie del suelo. Su valor debe ser lo más bajo posible, con un límite superior de $100 \Omega m$ [17]. La ventaja de tener un suelo de baja resistividad es que, normalmente, los demás parámetros de selección del sitio son también favorables.

3.5.2 Conductividad térmica y capacidad de calor

El sitio debe tener buenas propiedades termodinámicas para disipar el calor que se genera en los electrodos enterrados, representado por la conductividad térmica y la capacidad de calor. Para el caso de electrodos inmersos en agua de mar, no se consideran estas propiedades eléctricas.

3.5.3 Temperatura ambiente y temperatura máxima de operación

La temperatura crítica del electrodo está determinada por la diferencia entre la temperatura ambiente de su entorno y la máxima temperatura de operación permitida para el electrodo, la cual nunca debe ser mayor que la temperatura de ebullición del agua, ya que esto permite la inestabilidad térmica del electrodo y la erosión (electro-ósmosis) en el entorno del electrodo para condiciones de operación continua.



3.5.4 Humedad

La presencia de humedad en el sitio representa una condición favorable para su selección en el diseño, ya que se favorecen también los parámetros eléctricos como resistividad y conductividad térmica del suelo.

3.6 Aspectos técnicos, económicos y tiempo de ejecución

3.6.1 Tiempo de operación del electrodo de puesta a tierra

Los requisitos de un electrodo que opera en modo con retorno por tierra dependen de la cantidad de corriente que será aplicada en tierra, ya que esta corriente determina los niveles de potenciales sobre el suelo y la distancia requerida entre los electrodos y las estaciones de transformación e infraestructura sensible. Si el electrodo no es operado en forma continua, los efectos de corrosión disminuyen considerablemente al igual que los problemas térmicos y de electro-ósmosis.

3.6.2 Distancia de la estación convertidora

El electrodo debe ubicarse lo suficientemente lejos de la estación convertidora para evitar la corrosión o la saturación de los transformadores conectados a tierra. El costo de la línea de enlace (entre la estación convertidora y la estación del electrodo) tenderá a favorecer distancias más cortas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los costos adicionales que podrían resultar de elegir un sitio de electrodo inapropiado pueden ser mayores que el costo adicional de una línea de enlace más larga para una mejor ubicación del electrodo. La ubicación de la estación convertidora también puede hacer que algunas ubicaciones de electrodos sean poco prácticas o costosas si la línea de enlace tiene que atravesar terrenos muy accidentados, áreas densamente pobladas o ríos anchos, etc.

Si el cálculo y el análisis de la distancia recomendada en la IEC 62344 [6] no son posibles, la distancia desde el sitio del electrodo a cualquier estación de conversión o a una estación de 220 kV o mayor de CA, no debe ser inferior a 10 km en general para disminuir la CD en los transformadores de CA, y la distancia mínima desde el sitio del electrodo a cualquier línea de alimentación aérea con hilo de guarda conectado a tierra debe ser superior a 5 km para disminuir la corrosión de los dispositivos de puesta a tierra de la torre.



3.7 Etapa de investigación geofísica y geológica

Esta etapa consiste en recopilar información geológica y geofísica de archivos públicos disponibles en un modelo regional de parámetros relevantes para la selección de sitios candidatos. La cantidad de información y el nivel de detalle pueden variar considerablemente de un área a otra. El informe debe señalar las áreas generales donde podría ubicarse un electrodo, aunque tal vez no sea posible determinar ubicaciones específicas. El informe también debe incluir información sobre qué información, si corresponde, falta para los próximos pasos en el proceso que se llevará a cabo. Deben darse recomendaciones sobre investigaciones de campo complementarias.

La información típica puede incluir, pero no está limitada a:

- Mapas geológicos: generalmente están disponibles a diferentes escalas, como los estudios geológicos nacionales. Los mapas pueden ir acompañados de descripciones de texto.
- Mediciones geofísicas profundas: podrían incluir estudios magneto-telúricos de investigaciones científicas o de exploración geotérmica. Pueden contener imágenes de estructuras de resistividad superficial y su extensión a capas más profundas. Datos geofísicos obtenidos de naves aéreas: esto puede estar disponible a partir de algunos estudios geológicos nacionales y proyectos de exploración de minerales o aguas subterráneas. Los datos magnéticos y radiométricos son los más comunes, pero los datos electromagnéticos que brindan información directa sobre la resistividad del suelo también podrían estar disponibles. Los datos pueden relacionarse con el tipo de material del subsuelo.
- Datos de exploración de minerales o petróleo: las mediciones de resistividad del suelo con fines de exploración son patentadas y no están disponibles en la mayoría de los casos. Sin embargo, algunos países requieren que las compañías de exploración presenten sus datos en algún archivo público cuando se abandona un permiso de exploración. Es posible adquirir tales datos a bajo costo.

Se pueden encontrar datos de información sobre la actividad geotérmica, las aguas termales, los gradientes térmicos, etc. en diversas fuentes. El flujo de calor elevado a través de la corteza terrestre generalmente está relacionado con una baja resistividad eléctrica.

Datos de aguas subterráneas: algunos países mantienen archivos públicos de pozos para la exploración y producción de aguas subterráneas. La información puede incluir el nivel del agua subterránea, la salinidad del agua y la conductividad eléctrica. Esta información se puede



utilizar para ubicar áreas con nivel de agua subterránea poco profundo, de modo que sea posible un diseño de electrodo de bajo costo.

Mapas geológicos marinos: Mapas disponibles en muchos países. Si no está disponible, podría ser posible inferir condiciones geológicas a corta distancia de la línea de costa desde mapas geológicos de áreas terrestres vecinas. Los datos batimétricos (profundidades marinas) detallados pueden ser de difícil acceso ya que dicha información generalmente se trata como clasificada, y tendrían que tramitarse permisos especiales.

3.7.1 Modelo inicial de resistividad

Durante la etapa de planeación, las áreas alrededor de algunas estaciones convertidoras pueden contener infraestructura sensible, y algunas áreas pueden tener condiciones geológicas que ya se pueden esperar que sean desfavorables en una etapa temprana. En tales casos, se aconseja construir un modelo tentativo de resistividad del suelo basado en el resultado del estudio de gabinete exclusivamente. Esto implica que la complejidad del modelo será una función de los datos disponibles, y la resistividad con ciertas unidades geológicas puede ser completamente desconocida.

Los valores se pueden asignar en función de la experiencia de otros lugares con condiciones geológicas similares. El modelo se puede usar para estimar la magnitud de la elevación del potencial de tierra y el campo eléctrico en función de la distancia desde una posición tentativa del electrodo. Las estimaciones deben tratarse como indicativas solo si el modelo se basa en parámetros con un grado de incertidumbre o inferidos de otros estudios con características similares.

3.7.2 Estudios de campo iniciales

En muchos casos, un estudio de gabinete geocientífico no podrá establecer la resistividad del suelo a gran profundidad. El estudio de gabinete y el modelo de resistividad inicial deben determinar si dicha información es necesaria para la selección del sitio y, si es así, deben realizarse estudios magnetotelúricos. Sin embargo, es posible que los niveles de campo eléctrico en algunos casos correspondan a valores insignificantes (por ejemplo, alrededor de un electrodo de mar o de tierra) a una distancia tan corta que una inspección profunda no sea necesaria.

La distribución de las estaciones de reconocimiento para una investigación magnetotelúrica dependerá de la geología del área y puede variar desde estaciones dispersas hasta mediciones de perfil sistemáticas en estructuras geológicas significativas. Los datos



magnetotéluricos deben interpretarse con cuidado. La interpretación de los estudios de campo iniciales debe ser compatible con la geología conocida y con valores de resistividad razonables.

Las estaciones de reconocimiento magnetotélúrico no necesitan colocarse exactamente en el sitio considerado del electrodo, ya que muchas veces esto requiere el acceso a propiedades privadas. En cambio, pueden colocarse en sitios públicos que no requieren permisos o donde tales permisos son fáciles de conseguir.

Las investigaciones de campo iniciales también deben incluir visitas al sitio para el mapeo de reconocimiento geológico. Las visitas al sitio deben centrarse en determinar la información y los parámetros que son esenciales para el diseño y la construcción de los electrodos. Esto incluye tipos de roca y suelo, tamaño de partícula del suelo, niveles de humedad del suelo, posible profundidad al nivel freático, acceso a la tierra, impedimentos para la construcción, factores ambientales, etc.

En los casos donde es evidente que la selección del sitio será difícil con base en la información del estudio de gabinete, es necesario realizar una mayor prospección geofísica a bordo de naves aéreas para realizar una profunda exploración geofísica y realizar visitas de campo. Este estudio puede cubrir un área grande a un costo razonable y los permisos generalmente no son un problema grave.

Las investigaciones de campo iniciales para electrodos marinos pueden incluir investigaciones de sonar o ecosonda de la topografía y morfología del fondo marino. Las investigaciones de campo iniciales también deben identificar posibles obstáculos para el trazado y la construcción de la línea de enlace.

3.7.3 Selección del sitio

Los sitios candidatos para un electrodo deben seleccionarse en áreas que hayan superado el proceso de sitios “no aptos” y donde se puedan esperar las condiciones geológicas apropiadas según los estudios geológicos de gabinete y las investigaciones iniciales de campo. El proceso para la selección dependerá del entorno geológico y del tipo de electrodo que se haya seleccionado.

En general, se recomienda seleccionar una serie de sitios candidatos, ya que algunos de ellos podrían ser descalificados más adelante en función de los resultados de las investigaciones detalladas del sitio.

Los electrodos terrestres basados en zanjas se deben ubicar preferiblemente en áreas con aguas subterráneas poco profundas. Deben evitarse las ubicaciones con rocas de alta



resistividad a poca profundidad, incluso si están cubiertas por suelo de baja resistividad.

Deben evitarse los suelos de arcilla fina si el electrodo se va a utilizar en modo anódico, ya que pueden producirse problemas con la electro-osmosis. Los mapas topográficos, los datos de pozos, las imágenes satelitales y las fotografías aéreas son conjuntos de datos útiles en la selección de lugares con aguas subterráneas que se considere poco profundas. Los electrodos de pozos profundos formados por pozos verticales deben ubicarse en áreas con una cubierta bastante gruesa de sedimentos aluviales y rocas sedimentarias permeables. El agua subterránea debe estar a una profundidad razonablemente baja para evitar la necesidad de perforar agujeros profundos. La perforación también puede complicarse por sedimentos no consolidados ya que los agujeros pueden colapsar.

3.7.4 Derechos de vía, servidumbre de paso y adquisición del terreno

En muchos casos, las investigaciones de campo detalladas requerirán permisos de propietarios y partes interesadas. Por lo tanto, las investigaciones geofísicas y geológicas podrían limitarse a los sitios seleccionados donde se consideró la obtención de los permisos. El trámite de permisos puede tomar un tiempo considerable. Por lo tanto, es esencial que todo el proceso de selección del sitio se inicie en las etapas iniciales del proyecto para que la selección del sitio no se degrade en un proceso donde la obtención de los permisos con prontitud sea esencial.

La selección final del sitio del electrodo requerirá la adquisición de la tierra. También se debe obtener o arreglar una servidumbre o un derecho de paso para la línea de enlace. Es posible que ya existan servidumbres para la línea HVDC o para alguna línea de CA de la estación convertidora que se pueda usar por lo menos para una parte de la línea de enlace.

3.7.5 Investigaciones detalladas de campo

Deben llevarse a cabo investigaciones detalladas del sitio con métodos geofísicos para probar si los sitios candidatos cumplen los requisitos para una ubicación de electrodos. Las pruebas de los sitios candidatos en tierra podrían requerir perforaciones en algunos casos. Los sitios de electrodos se pueden probar con mediciones de resistividad. Las mediciones de perfil que usan un sistema multi-electrodo permitirán el modelado bidimensional o tridimensional de los datos, mientras que los sondeos como el arreglo Schlumberger serán adecuados si se sabe que la geología está estratificada horizontalmente y con pequeñas variaciones laterales en las propiedades eléctricas.

La profundidad de la investigación debe corresponder a las dimensiones físicas del diseño



esperado del electrodo. Los datos adquiridos junto con los datos magneto-telúricos deben ser lo suficientemente detallados y con suficiente profundidad de investigación para que un modelo de resistividad pueda ser compilado lo más completo posible para estimar el campo eléctrico alrededor del electrodo.

Las medidas de resistividad con resolución detallada para las capas cercanas a la superficie también deben llevarse a cabo si se considera un diseño de electrodo de tierra superficial. Para sitios de gran tamaño, se deben tomar varios perfiles topográficos cerca de la ubicación de las zanjas del electrodo planeado.

La interpretación y el modelado de mediciones de resistividad no es un proceso único, ya que depende de las consideraciones y la experiencia de ingeniería. Debe siempre procurarse que los datos utilizados en el modelado sean realistas y compatibles con información geológica relevante. Algunas veces puede ser importante tener un conocimiento de los parámetros hidráulicos para identificar problemas potenciales como la electro-ósmosis. La información sobre las propiedades del acuífero se puede obtener mediante sondeos de resonancia magnética (MRS) o perforando pozos.

3.7.6 Modelo detallado de resistividad

El modelo de resistividad inicial se puede actualizar en función de los datos de las investigaciones de campo detalladas en los sitios candidatos. Deben prepararse modelos separados para todos los sitios candidatos, a menos que algunos lugares se puedan excluir inmediatamente debido a propiedades inadecuadas. El volumen del suelo debe representarse en una malla adecuada para el modelado numérico, y así calcular el campo eléctrico debido a la corriente aplicada.

3.7.7 Diseño preliminar y modelado del electrodo

En la etapa del proceso de selección del sitio, generalmente es posible prever qué tipo de electrodo será el más adecuado y se puede hacer un diseño preliminar. Se puede usar un modelo preliminar de electrodos para establecer las dimensiones iniciales que generarían los potenciales de paso y contacto esperados dentro de los límites aceptables.

El modelo preliminar se puede usar para verificar si el sitio del electrodo tiene propiedades aceptables. Los potenciales estimados se pueden comparar con los requisitos para potenciales eléctricos y gradientes de potenciales en infraestructura sensible. Los gradientes de potencial estimados en el electrodo se pueden comparar con los potenciales de paso y de contacto máximos permitidos.



3.7.8 Investigaciones de perforaciones de prueba

Se recomienda realizar investigaciones adicionales en el sitio que se ha seleccionado para el electrodo. Probablemente sea necesario realizar perforaciones de prueba antes de que se pueda finalizar el diseño del electrodo. La perforación puede llevarse a cabo con percusión, circulación inversa o perforación de núcleos. La elección de la técnica de perforación depende del entorno geológico, la información que se requiere de la investigación del pozo y la disponibilidad de plataformas de perforación. La selección también obedece a los costos asociados de las diferentes técnicas.

Pueden realizarse diferentes tipos de investigaciones geológicas con perforaciones de prueba, dependiendo de la situación geológica, el tipo esperado de diseño del electrodo y la disponibilidad de equipos y contratistas. Las posibles investigaciones incluyen:

3.7.9 Mapeo geológico de núcleos de perforación.

Definición de los niveles de la capa freática o la superficie piezométrica del agua subterránea y el monitoreo de los cambios estacionales. Realización de pruebas de bombeo para obtener estimaciones “en sitio” de la conductividad hidráulica.

Muestreo de aguas subterráneas y mediciones de conductividad, pH, etc.

Registro de resistividad “en sitio” con una sonda de inducción.

Registro de resistividad “en sitio” con una sonda galvánica. La sonda galvánica requiere que el orificio esté lleno de agua. Las sondas galvánicas tienen una mejor resolución para capas de alta resistividad, mientras que las sondas inductivas tienen una mejor resolución para capas de baja resistividad.

Muestreo de suelo, del tipo utilizado con un tubo de Denison. Las mediciones de resistividad eléctrica, conductividad hidráulica, permeabilidad electro-osmótica, porosidad y propiedades térmicas pueden llevarse a cabo en este tipo de muestreo.

Pruebas de respuesta térmica, que proporcionan estimaciones “en sitio” de la conductividad térmica.

Independientemente de las estimaciones de resistividad en gabinete y uso de tablas genéricas, se recomienda que las mediciones de resistividad se realicen “en sitio”. El registro de resistividad del suelo con sonda inductiva proporcionará información detallada de la resistividad por el agujero si no se ha utilizado una carcasa metálica.

Para un diseño de electrodo basado en una perforación, ésta proporcionará información valiosa sobre la estabilidad y la afluencia de agua que es necesaria en la planeación de cómo



bajar los elementos del electrodo en los orificios del electrodo y rellenar esos orificios.

3.7.10 Electrodo de prueba

El modelado de datos de levantamientos geofísicos puede no ser un proceso exclusivo (único) y es importante verificar diversas fuentes de datos independientes o resultados de pruebas independientes para que se pueda establecer un modelo de resistividad razonablemente correcto para el área que rodea el sitio del electrodo.

Pueden utilizarse las mediciones realizadas con un electrodo de prueba para verificar si el modelo de resistividad es lo suficientemente preciso, al menos a una profundidad que corresponda a la profundidad de investigación del electrodo de prueba y su electrodo remoto asociado. En caso de discrepancias, el modelo de resistividad puede actualizarse, y debe ser compatible con todos los datos obtenidos del levantamiento geofísico.

Siempre debe considerarse la posibilidad de utilizar perforaciones de investigación como electrodos de prueba. Se puede hacer un electrodo de prueba bajando un número de varillas de acero conectadas a través de un pozo y conectándolos a una fuente de CD o de CA de baja frecuencia. La ventaja de una aplicación de CA de baja frecuencia en lugar de una fuente de CD es que sería más fácil discriminar entre la señal debido a la fuente de prueba y los niveles de fondo debido a las corrientes telúricas a largas distancias desde los puntos de aplicación.

Es posible construir un electrodo de prueba si no hay un pozo disponible. Las varillas de acero pueden introducirse en el suelo o enterrarse en un pozo. Sin embargo, podría ser difícil aplicar una corriente suficientemente alta para facilitar las mediciones con un electrodo de prueba de este tipo si la superficie del suelo tiene una alta resistividad.



Capítulo 4. PARÁMETROS DEL ELECTRODO

4.1 Consideraciones en el Diseño

Para diseñar un EPT se necesita saber cuáles son los efectos adversos que puede producir y delimitar de manera que no se superen los límites que dañen al ecosistema que existe en las cercanías del electrodo. Los principales parámetros que influyen son el gradiente de potencial que puede producir tensiones de paso y de contacto indeseables, y también la temperatura que se producirá en el electrodo, producto de la inyección de corriente durante el funcionamiento continuo. Además de estos parámetros, existen consideraciones técnicas que se deben pensar y diseñar de manera óptima para el funcionamiento del sistema de transmisión HVDC, como son la tensión del electrodo y la resistencia que se producirá cuando el sistema HVDC opere con el retorno por tierra.

Uno de los datos importantes que es necesario conocer antes de comenzar el diseño del electrodo es la corriente que transitará por el electrodo. Esta corriente puede ser una corriente de sobrecarga de corta duración y que no se alcanza en la operación normal del sistema de transmisión. Para conocer esta corriente se debe saber principalmente que configuración de sistema de transmisión se usará.

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 permiten obtener un valor aproximado de las dimensiones de un electrodo terrestre de distintas configuraciones, realizando varias suposiciones, tomando como referencia inicial de un terreno homogéneo, es decir, de una sola capa de resistividad. Condición difícil de conseguir, dado que el suelo comúnmente es heterogéneo. La única forma posible de considerar un modelo de suelo homogéneo, es en la etapa de dimensionamiento del electrodo y sólo cuando las resistividades del terreno son parecidas en el área que se pretende instalar el electrodo.

4.1.1 Gradiente de Potencial

Cuando el electrodo está en operación la corriente que circula a través de él, produce un campo eléctrico en el suelo circundante. Este campo produce tensiones en la tierra, por lo que se deben considerar las tensiones de paso y de contacto permitidos para personas y animales.

La tensión de paso es la diferencia de tensión que se produce en una persona entre cada pie cuando da un paso, o la diferencia entre los pies de un animal. Kimbark [18], define para la tensión de paso de los humanos, una distancia de 1 metro de pie a pie, y para los animales de gran tamaño, como vacas o caballos, una diferencia de 2 m. Esta lógica queda descrita en la

Figura 4.1. La tensión de carácter permanente a la cual se produzca una molestia dependerá exclusivamente de la resistividad superficial de la tierra, tal como se ve en las siguientes ecuaciones (4.1) y (4.2):

$$\text{Tensión máxima para personas} \quad E_{\max} = 5 + 0.03 \rho_s \quad (4.1)$$

$$\text{Tensión máxima para animales grandes} \quad E_{\max} = 11 + 0.24 \rho_s \quad (4.2)$$

Donde ρ_s representa la resistividad superficial.

Esta meta del diseño considera, como se dijo en el párrafo anterior, una tensión a la cual la persona o animal grande sentirá una pequeña molestia en su cuerpo, y no una tensión peligrosa que pueda causar su deceso. Si no es posible obtener esta meta, será necesario disponer una cerca que restrinja el acceso solo a personal autorizado.

Cabe señalar que al diseñar el electrodo sólo se usa como límite de tensión máxima de paso para las personas, ya que de esta forma los animales grandes están dentro del margen de seguridad, y lo mismo pasa con animales más pequeños que al tener una distancia muy corta entre patas, la diferencia de potencial es mínima [17].

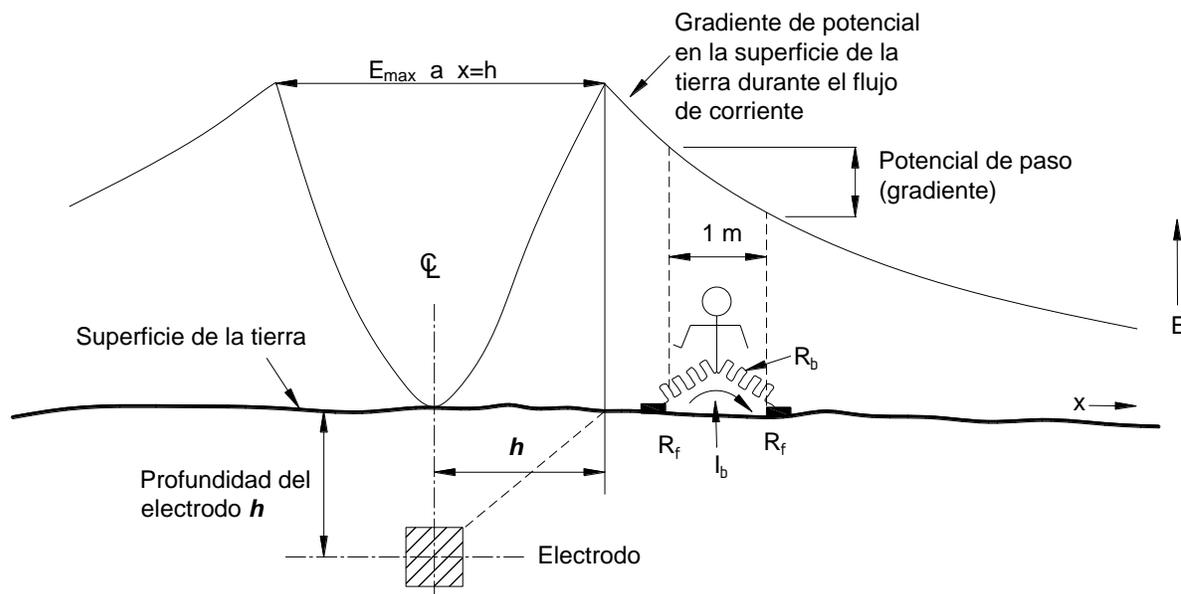


Figura 4.1 Gradiente de voltaje.

La tensión de contacto se define como la tensión entre la superficie del suelo y cualquier objeto conductor que una persona pueda tocar, por ejemplo, una cerca, y el límite que se debe mantener es el mismo que el de la tensión de paso [19]. También será reconocida como tensión de contacto la diferencia de potencial que se produzca entre el electrodo (considerando incluso los equipos y cables al interior de la casa, mufa) y el suelo.



4.1.2 Temperatura

La inyección de corriente a la tierra producirá un aumento de la temperatura en el suelo circundante al electrodo producto principalmente del efecto Joule. Para conocer la temperatura que el electrodo y el suelo circundante tendrán, se debe conocer previamente el tiempo continuo que funcionará el electrodo, siendo distinto dependiendo de la configuración HVDC que se elija para transmitir energía. Por ejemplo, en un sistema monopolar, el electrodo funcionará de manera permanente, mientras que en el sistema bipolar solo lo hará en caso de emergencia. Por lo anterior, en el diseño de un electrodo que opere en un sistema monopolar la temperatura será un factor determinante en el diseño, y no tanto así para el electrodo que opere en un sistema bipolar. No obstante, el que la temperatura no sea determinante para el último caso, es necesario de todas formas conocerla.

La corriente de diseño que se usará para conocer la temperatura del electrodo y del suelo circundante será la corriente que tendrá el sistema después de la sobrecarga. No se usa la corriente de sobrecarga debido a su corta duración y por ende la poca influencia en el aumento de temperatura.

La transferencia de calor del electrodo al suelo se puede producir por los procesos de conducción, convección y radiación. Por el mecanismo de conducción termal se desarrolla principalmente el flujo de calor en el suelo. La propagación de calor producto de la convección, si es que existe la presencia de agua o de flujos de aire, es necesaria tomarla en cuenta porque puede ser importante. Sin embargo, la radiación solar no es determinante y su influencia es despreciable.

Para diseñar el electrodo es necesario determinar la temperatura máxima a la que podrá llegar el electrodo. El criterio usado es no sobrepasar la temperatura a la cual el agua hierve, es decir 100 °C [19], sin embargo, es usual que el límite de temperatura sea menor a esta, con el objeto de asegurar que el electrodo no sobrepase los 100 [°C]. Cabe señalar que la temperatura a la cual el agua hierve cambia dependiendo de la altura sobre el nivel del mar, por lo que es necesario conocer la altura del sitio de emplazamiento del electrodo [20].

Otro factor que determina la temperatura y el desempeño del electrodo es la electroósmosis. La electroósmosis es el movimiento del agua circundante al electrodo producto de la corriente eléctrica, por lo que produce una disminución acelerada de la humedad y por ende el aumento de la resistividad del suelo, que provocará finalmente un mal funcionamiento del electrodo. Para que esto no ocurra es necesario limitar la densidad de corriente del electrodo a 1 (A/m²) [19].



4.1.3 Efectos del electrodo terrestre en otras instalaciones

Cuando el retorno por tierra comienza a operar en un sistema HVDC, se inducen potenciales CD en las estructuras metálicas que estén dentro de un área de influencia de los electrodos, provocando interferencias, corrosión, potenciales de contacto y saturación de transformadores [21], y aunque la densidad de corriente en la tierra decrece rápidamente, es difícil determinar una distancia límite a la cual el efecto del electrodo sea despreciable.

Para el caso de un sistema monopolar la operación del electrodo será permanente, y si la corriente que circulará por él no es de gran magnitud, los problemas que cause en otras instalaciones bajo tierra pueden ser comparables con una gran corriente de un electrodo de un sistema bipolar que opere solo en caso de falla o mantenimiento de un polo. Esto se debe a que la corrosión es proporcional a la integral en el tiempo de la corriente inyectada. Por ejemplo, la inyección de 1 (A) por 10 años, es lo mismo a inyectar 10 [A] por 1 año [21].

Los electrodos deben estar a cierta distancia de las subestaciones convertidoras. En la Tabla 4.1 [19], se muestran las distancias que los electrodos de algunos sistemas HVDC tienen con las subestaciones convertidoras y los potenciales que se generan en ellas, de manera de formar una idea de las magnitudes de tensión que las subestaciones pueden tener producto del funcionamiento del electrodo.

Tabla 4.1 Distancias entre electrodos y subestaciones conversoras y potenciales inducidos.

Esquema HVDC	Electrodo	Distancia a S/E Conversora [km]	Potencial en S/E [V]
Nueva Zelanda	Bog Roy	7,6	84,4
Cantons- Comerford	Lisbon	9	15,5
Gotland	Massänge	12	14,6
Itaipú	Foz do Iguazú	15,5	10
Pacific Intertie	Rice Flats	11	9,7
Fenno-Skan	Pampriniemi	30	9
Itaipú	Ibiuna (ex Sao Roque)	67	6,3
Konti-Skan	Risö	20	2
Baltic Cable	Smyge	23	0.45
Skagerrak	Lovns	24	0.24
Konti-Skan	Sora	26	0.06

Los problemas en las instalaciones ocurrirán por la diferencia de potencial que se tendrá en el suelo, que hará circular una corriente por la instalación produciendo corrosión acelerada del material metálico o alguna interferencia en sistemas.

4.1.4 Corrosión

La referencia [22] define la corrosión como un proceso electroquímico natural que existe en la naturaleza donde un material se deteriora por su reacción con su entorno. En general en los metales se producirá la corrosión, retornando al estado natural el metal por la producción de óxidos (generalmente).

Aunque en la tierra existen las llamadas corrientes telúricas, que son corrientes naturales del planeta producidas por variaciones del campo magnético de la tierra y que también causarán corrosión, la inclusión de la corriente que se produzca producto del electrodo aumentará el nivel de corrosión en los metales y por lo tanto la vida útil de las instalaciones que se encuentren en el radio de influencia del electrodo disminuirá.

Para determinar si el electrodo influye en alguna instalación, es necesario medir los potenciales que se tienen en la instalación producto de las corrientes telúricas. Estos datos se podrán comparar con los potenciales que produzca el electrodo y si estos últimos son mayores, entonces el electrodo generará problemas en la instalación, de lo contrario, el efecto del electrodo se podrá despreciar [18].

El nivel de corrosión dependerá de si el metal está protegido o aislado de alguna manera, del nivel del campo eléctrico, del largo del metal y la orientación del metal con respecto a la dirección de la corriente.

Lo que ocurre en el proceso de corrosión con el metal, por ejemplo, un oleoducto, será que, al existir distintos potenciales en la trayectoria del ducto, se producirá una corriente que entrará por la parte de mayor potencial y saldrá por la parte de menor potencial del ducto, produciendo un efecto que se aprecia en la Figura 4.2.

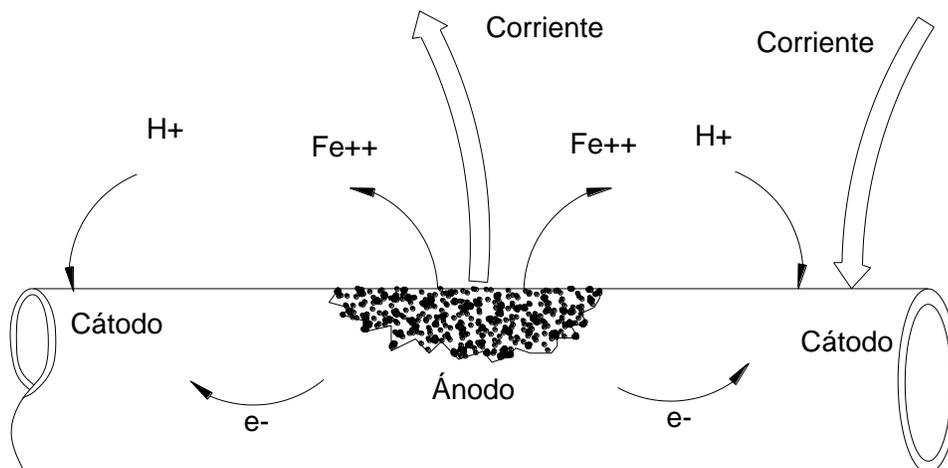
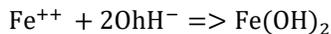
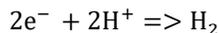


Figura 4.2 Corrosión en metales

De la figura anterior se puede ver que, en el ánodo, que es por donde la corriente sale, el metal se corroe por un proceso químico y no el cátodo, que es por donde la corriente entra. Típicamente, la reacción química que se produce es [17]:



Los iones positivos de Fe seguirán la dirección de la corriente al electrolito (tierra) y se combinarán con iones negativos, que es lo que la ecuación anterior muestra. Pero esa reacción libera 2 electrones que se combinan con iones positivos que se encuentran cercanos al cátodo, formando típicamente la siguiente reacción:



La cantidad de material que se corroe dependerá del material, de la densidad de corriente y de la duración de la corriente en el metal. Es por este motivo que es necesario tener como dato de entrada para el diseño del electrodo los amperes por hora al año.

Uno de los métodos más comunes en la protección de los metales contra la corrosión es la protección catódica. La filosofía de la protección radica en que como el cátodo de un metal no se corroe y solo se ve afectado el ánodo, entonces si el ánodo en vez de dispersar la corriente la atrajera cambiando de modo a cátodo, el metal no sufriría consecuencias. El modo por el cual se realiza lo anterior es a través de un rectificador en el metal que permitirá a la corriente circular en un solo sentido, por lo que la corriente entrará por el metal y se irá por el rectificador que será el nuevo ánodo. El procedimiento anterior se puede observar en la Figura 4.3.

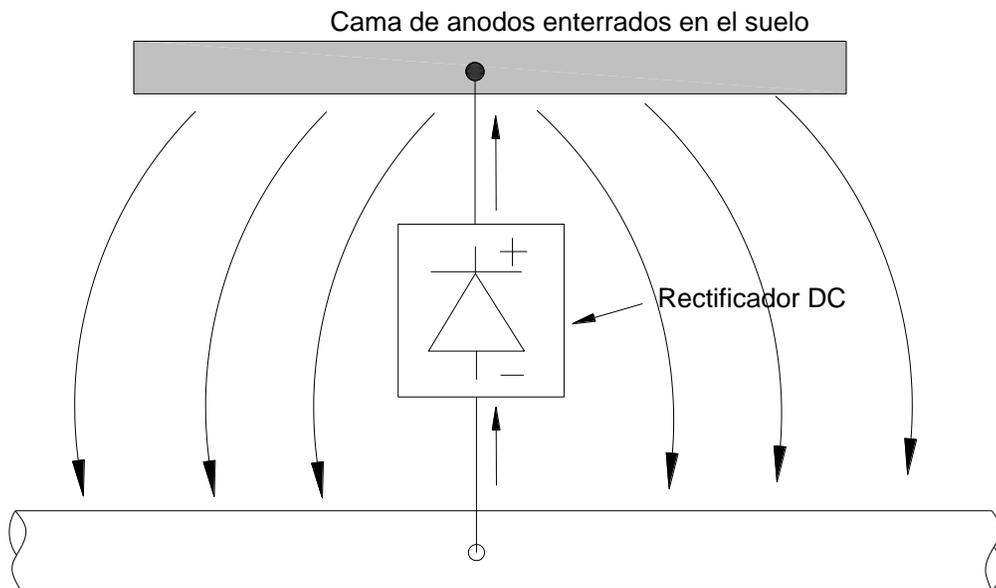


Figura 4.3 Protección catódica con rectificador CD.

Otro tipo de protección catódica, en lugar de usar un rectificador, es usar un ánodo galvánico como el magnesio o el zinc conectado al metal, como se ve en la Figura 4.4. La función del ánodo es la misma que la del rectificador anterior, es decir, dejar el metal protegido haciendo que la corriente solamente entre por todo el metal y se disperse a la tierra por el ánodo galvánico externo.

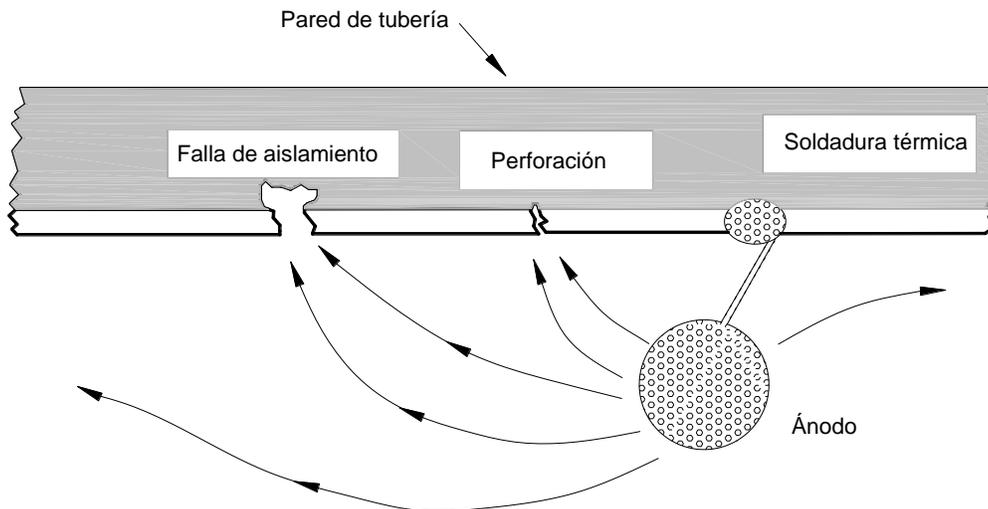


Figura 4.4 Protección catódica con ánodo galvánico.

La corrosión causa pérdida de material anódico en alguna forma de hierro cuando está en contacto directo con el suelo, debido a la conducción electrolítica a una razón dada en [22], sin embargo, cuando el hierro se deja dentro del coque, no hay un consenso en esta razón.

4.2 Materiales del electrodo

En la mayoría de los proyectos existentes los electrodos se construyen superficiales, como se ve en la Figura 4.5, con un conductor interno y con un material de relleno que recubre al conductor interno. La filosofía de construcción no cambia para los electrodos profundos, tal como se ve en la Figura 4.6 el conductor interno queda inmerso en un material de relleno.

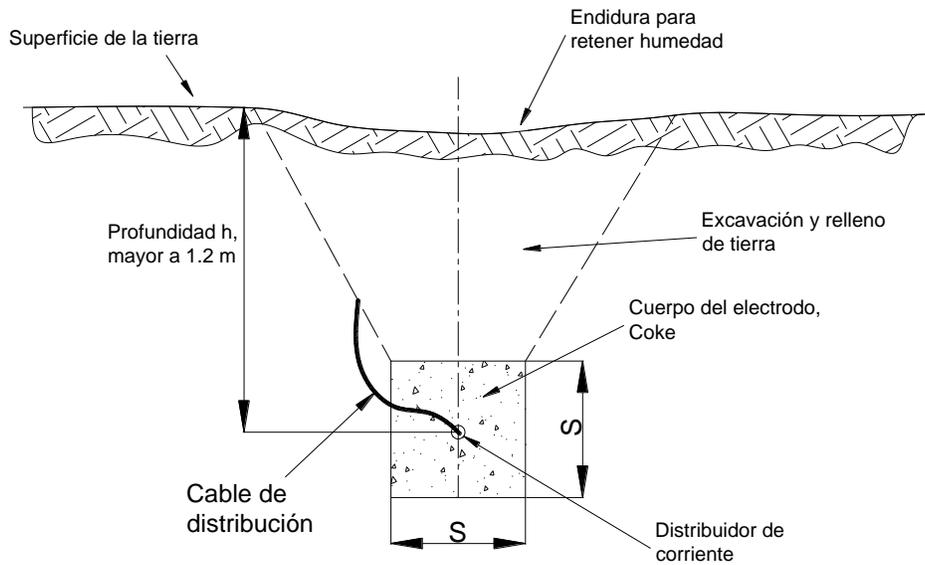


Figura 4.5 Sección del electrodo superficial.

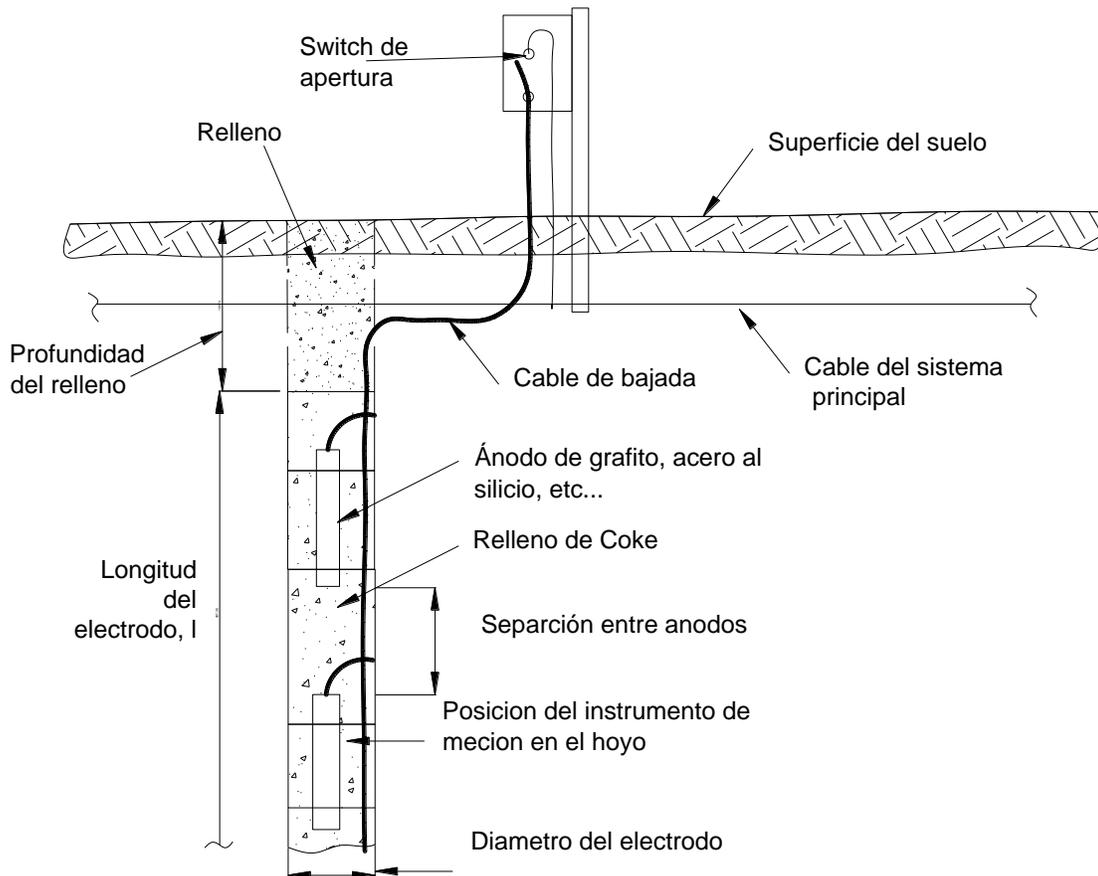


Figura 4.6 Sección electrodo profundo.

Los materiales que finalmente se usan deben considerar las propiedades eléctricas, como la conductividad, y propiedades físicas, como el esfuerzo mecánico y la corrosión, de manera de



tener un electrodo que funcione apropiadamente y que dure una vida útil factible de al menos 25 años [17].

4.2.1 Tamaño del electrodo

Existen varias formas de modelar electrodos con diferentes niveles de complejidad. Los métodos incluyen análisis análogos como el método EPRI, el método de imagen y los elementos finitos. Se podrían aplicar métodos más detallados durante las diferentes etapas del desarrollo del proyecto con los modelos más detallados que se usan en el diseño final. El tamaño del electrodo consiste en encontrar las dimensiones del electrodo (profundidad de enterramiento del electrodo, sección del relleno, radio en el caso de electrodos circulares (propuesto), número de pozos en el caso de electrodos profundos que satisfacen los límites de resistencia del electrodo, potencial de paso y contacto, densidad de corriente y temperatura). También se recomienda, después del dimensionamiento del electrodo, verificar la vida útil esperada del electrodo, así como la corrosión del material para un electrodo. Probablemente, la corrosión del material para un electrodo de un esquema bipolar podría ser insignificante, no así para aquellos que operan con esquemas monopolares, los cuales operarán durante largos períodos. El grado de influencia de los diferentes parámetros de dimensión es diferente en los resultados. Modificar el radio o la longitud del electrodo, tendrá un impacto mayor que si se modifica la profundidad o la sección transversal del relleno. Las dimensiones de un electrodo terrestre se pueden determinar siguiendo el proceso de diseño como se muestra en la Figura 4.6.

4.2.2 Conductor Interno

Se pueden utilizar tres tipos de materiales, todos ellos adecuados para un funcionamiento reversible, en lo que respecta al conductor interno [19]:

Varillas o tubos de acero (con más carbón en su contenido) o de acero dulce o templado (con menos carbón en su contenido): 30-40 mm o más de diámetro. El acero dulce puede ser varillas o tubos y tiene la ventaja de ser de bajo costo, fácil de transportar y robusto de manejar e instalar. El acero dulce debe utilizarse preferentemente en condiciones relativamente secas, ya que la saturación de agua en el coque que rodea al conductor implicaría una mayor corrosión del metal. Para pozos cortos, el conductor de acero se extiende en toda su longitud sin espacios ni roturas.

Varillas o tubos de SiCrFe (fierro-cromo-silicio): los elementos de fierro de cromo con alto contenido de silicio tienen comúnmente entre 45 mm y 150 mm de diámetro, con una longitud



entre 1,25 y 2,3 m. Las barras de electrodos normalmente cubren solo parcialmente la longitud total del relleno de coque (30-50%), lo que significa que la columna de coque se usa también para flujo longitudinal de corriente. Existe un cierto riesgo de una densidad de corriente desigual en el exterior del relleno de coque, especialmente cuando la resistividad del suelo es baja. Los electrodos de hierro de cromo con alto contenido de silicio son altamente resistentes a la corrosión, pero deben manejarse con cuidado debido a la fragilidad del material.

Varillas de grafito: comúnmente tienen 100 mm de diámetro y 1.2 - 2.4 m de longitud. Al igual que las varillas de SiCrFe, las varillas de grafito solo cubrirían parte de la longitud o profundidad del coque. Su uso es restringido debido a su baja resistencia mecánica y tendencia a descomponerse bajo la acción de grandes corrientes.

4.2.3 Material de Relleno

La experiencia en la operación de los electrodos ha demostrado que al agregar un material de relleno al conductor interno se mejora el desempeño del electrodo haciendo que la densidad de corriente sea menor debido a la mayor superficie de contacto que se tiene con el suelo. Esto produce una reducción de la temperatura del electrodo, limita los efectos de la electroósmosis y disminuye la corrosión del material [19].

El material de relleno que se usa en los electrodos terrestres es de coque, que puede ser de dos tipos distintos según [19]:

Coque de petróleo: este tipo de coque proviene del proceso de craqueo del petróleo refinado y es el más usado para los electrodos [19].

Coque de carbón: este tipo de coque proviene de la destilación del carbón bituminoso y es producido en trozos que al ponerlos en el relleno deben ser presionados en el terreno a aproximadamente 1 000 [kg/m²] [23]. La presión se debe realizar con precaución debido a que, si no se presiona lo suficiente, los gases que libera la operación del electrodo acelerarán la pérdida de material, mientras que una gran presión hará que los gases se demoren en llegar a la superficie para que sean ventilados por la atmósfera [19], además especifica las características límite que el coque debe tener.

A continuación, se mostrará las características químicas que esa referencia muestra, ya que será una de las más importantes al momento de cotizar el material:

- Porcentaje mínimo de carbón: 92%
- Porcentaje máximo de sulfuro: 1%
- Porcentaje máximo de volátiles: 0.2%
- Porcentaje máximo de cenizas: 1%



- Porcentaje de otros minerales: 0.5%

En el transporte y en el momento de instalar el coque en el sitio del electrodo, se debe tener la precaución de que no se mezcle con otros materiales que puedan contaminarlo, por ejemplo, con tierra.

El coque tendrá una resistividad que se puede considerar fija y no variará por efecto de la humedad [17], teniendo una resistividad de aproximadamente 2 [Ωm] [24]. Sin embargo, en [20] se dice que la resistividad del coque depende de la compresión dada, siendo valores aceptables entre 0.05 [Ωm] y 0.02 [Ωm] a 1,000 [kg/m^2] de compresión.

4.2.3.1 Sección transversal de coque

Para un EPT con retorno a tierra, si la constante térmica es mayor que la duración de la corriente nominal, la sección de coque en cualquier punto (P) de un EPT puede calcularse de forma conservadora la ecuación (4.5) para garantizar que la temperatura en cualquier punto (P) no excederá el valor permitido.

$$S_p \geq k \rho_m \tau_p \sqrt{\frac{T_0}{16\rho_p C_p(\theta_{mp} - \theta_c)}} \quad (4.5)$$

Donde:

- S_p es la longitud de la sección en cualquier punto (m)
- k Es el coeficiente equivalente, en un rango de 0,9~1,1; ver anexo F en [6]
- τ_p Densidad de corriente en cualquier punto (A/m)
- ρ_p es la resistividad del suelo donde está enterrado el electrodo ($\Omega\text{ m}$);
- C_p es la capacidad térmica del suelo donde está enterrado el EPT ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$)
- ρ_m es la resistividad del coque donde está enterrado el electrodo ($\Omega\text{ m}$);
- θ_{mp} es la temperatura más alta del suelo ($^\circ\text{C}$)
- θ_c es la temperatura más alta del coque ($^\circ\text{C}$)
- T_0 Es el rango de duración de la corriente nominal (s)

4.2.4 Diámetro de conductor interno

Para garantizar que los anillos tengan suficiente capacidad de soportar la corriente, vida útil prevista y el aumento de temperatura permitido, el tamaño del conductor interno debe cumplir con las ecuaciones (4.3) y (4.4).

$$\Phi_p \geq \sqrt{\frac{4k_1 k_2 \rho_p \tau_p F V_f + \pi \theta^2 \rho_m g I_d x 10^{-3}}{\pi \rho_m g I_d x 10^{-3}}} \quad (4.3)$$

$$\Phi_p \geq \frac{4S_p \rho_p C_p}{\pi \rho_p C} 10^3 \quad (4.4)$$

Donde:



S_p	es la longitud de la sección en cualquier punto (m) ver formula (4.5)
Φ_p	Es el diámetro equivalente de electrodo en el punto de instalación (mm)
k	Es el coeficiente equivalente, en un rango de 0,9~1,1; ver anexo F en [6]
τ_p	Densidad de corriente en cualquier punto (A/m)
ρ_p	es la resistividad del suelo donde está enterrado el electrodo (Ω m);
C_p	es la capacidad térmica del suelo donde está enterrado el EPT ($J/(m^3 \cdot ^\circ C)$)
ρ_m	es la resistividad del coque donde está enterrado el electrodo (Ω m);
θ_{mp}	es la temperatura más alta del suelo ($^\circ C$)
θ_c	es la temperatura más alta del coque ($^\circ C$)
T_0	Es el rango de duración de la corriente nominal (s)

4.2.5 Profundidad de instalación

La profundidad de instalación óptima del EPT se determina de acuerdo a una comparación técnica y económica basada en los siguientes principios:

- Control del voltaje de paso: Si la longitud del electrodo está dispuesta horizontalmente y la resistividad del suelo es uniforme, la profundidad mínima de instalación del EPT se puede calcular con la Fórmula (4.6) aproximadamente:

$$h = \frac{\rho_s \tau}{2\pi E_{sp}} \quad (4.6)$$

Donde:

h	es la mínima profundidad de instalación de EPT (m)
ρ_s	Es la resistividad del suelo (Ω m);
τ	es la densidad de liberación de corriente del electrodo de tierra, calculada con la corriente de tierra dividida por la longitud total del electrodo (A/m)
E_{sp}	es la máximo voltaje de paso del electrodo (V/m);

- el electrodo debe enterrarse en un suelo con baja resistividad, buen factor térmico y alta humedad, y no debe enterrarse en capas de roca, arena y grava, ni en suelos secos con alta resistividad;
- después de que se hayan cumplido las condiciones anteriores, se debe compactar sobre la instalación del EPT para reducir el asentamiento de la tierra,
- los EPT no se deben instalar a poca profundidad para evitar daños artificiales debidos a la agricultura y al cultivo asistido por máquinas y al impacto de la temperatura atmosférica en el funcionamiento de los electrodos. En general, los EPT deben enterrarse a una profundidad superior a 1,5 m.



4.2.6 Resistencia del electrodo

La resistencia del electrodo debe considerar dos aspectos:

1. La elevación de temperatura del suelo.
2. La elevación de las tensiones de paso y contacto en la estación del electrodo.

Su valor, en términos de ley de ohm, está dada por la ecuación (4.7), en unidades de (Ω).

$$R_e = \frac{V_e}{I_d} \quad (4.7)$$

Donde V_e es el aumento de tensión del electrodo e I_d es la corriente. La resistencia debe conservarse lo más baja posible para garantizar pérdidas del sistema en un rango aceptable. Si la duración de la corriente en el electrodo de tierra (típicamente la corriente nominal que fluye a tierra durante tiempos prolongados) es más larga que la constante de tiempo térmica del electrodo, la resistencia a tierra máxima permisible depende de la elevación de temperatura permisible (4.8) [24]:

$$R_e \leq \frac{1}{I_d} \sqrt{2\lambda_m \frac{\rho_e^2}{\rho_m} (\theta_{\max} - \theta_c)} \quad (4.8)$$

Donde:

- R_e es la resistencia de puesta a tierra entre el electrodo y una distancia infinita a tierra (Ω);
- I_d es la corriente de puesta a tierra que fluye en la tierra por tiempos prolongados (A);
- λ_m es la conductividad térmica del suelo donde está enterrado el electrodo de tierra ($W/(m \cdot ^\circ C)$);
- θ_{\max} es la temperatura máxima permitida del suelo ($^\circ C$);
- θ_c es la máxima temperatura natural del suelo ($^\circ C$);
- ρ_m es la resistividad del suelo donde está enterrado el electrodo (Ωm);
- ρ_e es la resistividad general equivalente de la tierra en el sitio del electrodo (Ωm)

Si la duración de la corriente es más corta que la constante de tiempo térmica del electrodo, la resistencia del electrodo de tierra puede ser mayor (4.9) (considerando el calentamiento del suelo):

$$R_{e \max} \leq \frac{1}{I_d} \sqrt{2\lambda_m \frac{\rho_e^2}{\rho_m} d_{\text{fac}} (\theta_{\max} - \theta_c)} \quad (4.9)$$

Donde:

- d_{fac} es el factor de disipación de calor, típicamente en un rango de 5 ~ 10. En ausencia de un valor exacto, se recomienda 5.

4.2.7 Características térmicas del electrodo

Al operar el electrodo, aumenta su temperatura y la del suelo circundante. Si es que el electrodo es mal diseñado, este aumento podría causar que el suelo circundante se seque y muera la vegetación, y que aumente la resistividad del terreno al existir menor humedad,

produciendo un aumento de la resistencia del electrodo [13].

La temperatura se mide a través de instrumentos con termistores que se disponen a lo largo del electrodo, entre el coque y el terreno, de manera de cubrir todos los cambios de tipo de suelo que se encuentren alrededor del electrodo.

Cuando una corriente de CD fluye a través de un electrodo de tierra y entra al suelo continuamente, la temperatura del suelo en el sitio del electrodo aumentará lentamente. Con base en la teoría de la dinámica térmica, la temperatura del suelo en cualquier punto cerca del electrodo de tierra se puede representar con la ecuación (4.10) [6], [23]:

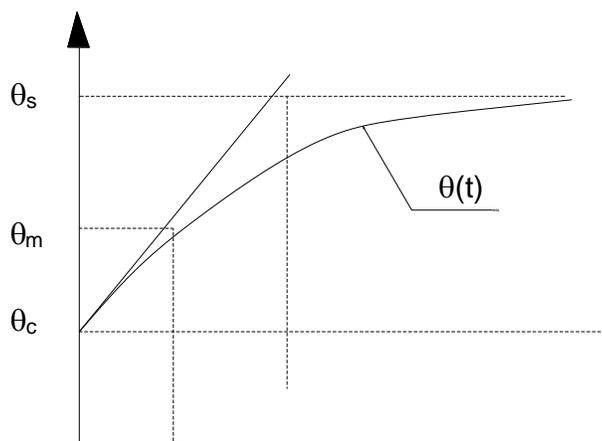


Figura 4.7 incremento de la temperatura del electrodo.

$$\theta(t) = (\theta_s - \theta_c)(1 + e^{-k\frac{t}{\tau}}) + \theta_c \quad (4.10)$$

Donde:

- $\theta(t)$ es la temperatura del suelo en un tiempo t ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_s es la temperatura estable del suelo en el sitio del electrodo de puesta a tierra cuando fluye una corriente continuamente ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_c en un ($t = 0$) temperatura el ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
- τ es la constante térmica en el tiempo (s)
- k es un coeficiente relacionado con las propiedades del suelo y las condiciones ambientales, que normalmente se debe determinar a través de una prueba.

La constante de tiempo es el tiempo necesario para que la temperatura del electrodo de tierra alcance un nivel estable con la velocidad de máxima inicial, y depende de los parámetros del suelo (resistividad, conductividad térmica y capacidad térmica).

En un campo de corriente uniforme, la constante de tiempo térmica del electrodo de tierra puede calcularse con la Fórmula (4.11) [6].

$$\tau = \frac{C}{2\lambda} \left(\frac{R_e A}{\rho} \right)^2 \quad (4.11)$$



Donde:

- τ es la constante térmica en tiempo (s)
- R_e es la resistencia del electrodo puesta a tierra (Ω)
- A es la superficie de coque (m^2)
- ρ es la resistividad (Ωm)
- C es la capacidad térmica del suelo ($J/(m^3 \text{ } ^\circ C)$)
- λ es la conductividad térmica del suelo ($W/(m \text{ } ^\circ C)$)

La temperatura máxima del electrodo de tierra no debe superar el punto de ebullición del agua. En caso de que la temperatura máxima de un electrodo de tierra sea superior al punto de ebullición del agua, la duración de funcionamiento o la amplitud de la corriente de toma de tierra deberá ser menor.

4.2.8 Vida útil del electrodo

Para cualquier tipo de electrodo, habrá desperdicio de material debido a la acción electrolítica presente en el tiempo de operación, que será proporcional al amper-hora de servicio en modo anódico. La vida útil del electrodo dependerá de la cantidad de corrosión, por lo que es importante instalar suficiente material.

Conductor interno: la vida estimada del conductor interno se indica en la siguiente ecuación (4.12):

$$W = \frac{I \cdot t \cdot C}{f} \quad (4.12)$$

Donde:

- W = Peso total del ánodo (kg)
- I = Corriente de descarga promedio (A)
- t = Vida útil de diseño (años)
- C = Tasa de consumo del material (kg/A-años)
- f = Factor de utilización (0.0 – 1.0)

La tasa de consumo del material depende del entorno en el que se coloca, y normalmente debe estimarse en función de la información proporcionada por el fabricante del material cuando se prueba en condiciones similares. El fabricante del material del electrodo generalmente podría dar los gramos electrolíticos por amper-hora o alguna otra indicación, pero con frecuencia no puede dar información más precisa para cada tipo posible de condición ambiental en la que se instalaría el electrodo.

Como ya se ha descrito, este entorno normalmente estará dentro de un lecho de relleno de coque. La tasa de consumo es alta cuando el conductor interno está en contacto directo con



el suelo. Por ejemplo, como explica Kimbark [18], un ánodo de hierro con 1000 A, puede tener una pérdida teórica de masa de aproximadamente 9,0 kg por amper-año; este mismo ánodo cubierto de coque, podría tener una pérdida de masa de 0,140 kg por amper-año. La razón de tener una tasa menor de pérdida del hierro cubierto de coque es el tipo de conducción, desde el hierro hasta el coque, el cual es principalmente electrónico, pero desde el hierro hasta el suelo es principalmente electrolítico. El factor de utilización es el porcentaje del material que se puede usar antes de que falle.

El consumo del relleno puede ser problemático porque el conductor interno puede estar expuesto directamente al suelo, lo que da como resultado un aumento de la tasa de consumo del conductor interno. La vida del relleno podría estimarse usando la misma ecuación que para el conductor interno, pero con una tasa de consumo supuesta de 1 kg/A-Año. El factor de utilización sugerido es del 50%, que es muy conservador debido a la situación crítica de la exposición del conductor interno como se explicó anteriormente. Como criterio para el diseño del electrodo, se puede considerar que el ánodo seguirá siendo útil hasta que pierda el 50% de su masa y debería durar al menos la vida útil del proyecto de transmisión.

La pérdida de material del EPT causada por la corrosión no debe afectar su funcionamiento normal. Durante el cálculo de la vida útil por corrosión del electrodo, deberán tomarse en cuenta los siguientes aspectos.

Para un sistema monopolar (o un sistema bipolar con un polo construido y puesto en operación en una etapa más temprana), la polaridad de los electrodos de puesta a tierra puede determinarse por los estudios de planificación del sistema. Donde no se especifiquen requisitos específicos, el diseño debe basarse en el tipo anódico

Después de que un sistema bipolar (operado en modo monopolar) entre en servicio, debe considerarse la operación del circuito usando la tierra como retorno cuando uno de los polos se encuentre fuera de servicio por reparación o mantenimiento. Para este caso, deben calcularse los amper-hora de funcionamiento como un ánodo, tomando como base los datos proporcionados por los estudios de planeación del sistema

Durante la operación bipolar, debe seleccionarse los amper-hora de corriente de desbalance que se espera durante la operación del EPT en modo anódico.

4.2.9 Extensiones futuras

Después de haber seleccionado una configuración y determinado el tamaño, debe considerarse la situación de tener que extender el arreglo. Cualquier extensión puede ser causada por la actualización posterior, o simplemente si la puesta en marcha de pruebas del



electrodo terminado muestra resultados desfavorables. Como regla general, será difícil llegar a la misma densidad de corriente en las partes nuevas. Si las nuevas partes están ubicadas dentro o completamente rodeadas por la parte existente, la densidad de corriente de las nuevas piezas será menor (suponiendo la misma sección transversal de la zanja).

Sin embargo, si las nuevas partes son extremidades de la configuración existente, entonces las nuevas partes tendrían una mayor densidad de corriente, y las partes existentes tendrían una disminución en la densidad de corriente. Por ejemplo, si un electrodo de anillo único se extiende con un nuevo anillo interior, se preferirá un diámetro de aproximadamente 80 por ciento para obtener la menor resistencia combinada posible a la tierra remota, pero el anillo interior tendrá una densidad de corriente menor que el anillo exterior. Realizar la configuración óptima del electrodo es a menudo una cuestión de prioridad y economía.

¿A qué debería aspirar el diseñador con un consumo dado de materiales y mano de obra ?:

1. Las pérdidas más bajas posibles (la resistencia más baja posible).
2. El mejor intercambio de corriente posible entre los elementos.
3. Las tensiones de paso más bajas posibles.

4.3 Estudios de impacto

Después de seleccionar un sitio potencial para la ubicación del electrodo, se debe realizar un estudio de interferencia e impacto ambiental para investigar el alcance de la posible interferencia de la operación del electrodo en las instalaciones circundantes y el entorno natural. La ubicación del electrodo varía, y tanto los criterios técnico-económicos como las restricciones ambientales se consideran como parte de las limitaciones para encontrar un sitio adecuado. Un estudio de interferencia es importante para investigar si un potencial impacto ambiental representa una condición restrictiva en la selección entre un sitio y otro, o si sus consecuencias potenciales pueden ser evitadas o mitigadas, o si tales consecuencias son marginales y pueden despreciarse.

4.3.1 Datos

Se deben recopilar los siguientes datos para investigar y estimar los efectos reales de la aplicación de CD en un sitio de electrodos específico.

Levantamiento geológico/geofísico para establecer magnitudes de resistividad aproximadas e identificar dónde se tienen grandes diferencias en resistividad entre diferentes tipos de rocas o suelos. Esta última propiedad es importante, porque determina las trayectorias que tomará la corriente a través de la tierra y, por lo tanto, las posibles interferencias.



- Estimación de la resistividad superficial.
- Estimación de la resistividad profunda.

Propiedades térmicas del suelo para las consideraciones de diseño que se pueden hacer en una etapa posterior.

Instalaciones potencialmente afectadas tales como líneas de transmisión con transformadores conectados a tierra y sus características, tuberías metálicas, cercas metálicas de gran longitud, grandes sistemas de riego radial, instalaciones metálicas enterradas cerca del electrodo, líneas y antenas de cable de telecomunicaciones, etc.

Vida marina circundante en el caso de los electrodos de mar.

Estimación de la resistividad de agua de mar en el caso de los electrodos de mar, playa y tierra que están cerca del mar.

En el caso de que el agua dulce esté en contacto con el agua de mar, la estimación de la resistividad debe considerar la resistividad vs la profundidad, porque el agua dulce tiende a ir a la superficie mientras que el agua salada tiende a irse hasta el fondo.

Estimaciones climáticas para cubrir las variaciones en las propiedades del suelo durante el año.

4.3.2 Rangos de operación y condiciones de uso del electrodo:

- Amperes-hora por año
- Condición de funcionamiento transitoria
- Condición de funcionamiento a corto plazo
- Corriente nominal continua del polo
- Corriente nominal continua inherente del polo
- Máxima corriente de falla transitoria del polo
- Corriente máxima de sobrecarga del convertidor de cortocircuito del polo

Los fenómenos de interferencia debido a los electrodos representan un problema complejo porque se involucran múltiples variables y, a menudo, es difícil medirlas con precisión. Se pueden hacer consideraciones y simplificaciones a priori, debido a la gran área de influencia potencial del impacto y especialmente si las características geográficas son demasiado heterogéneas. Por ello, deben aplicarse herramientas matemáticas si la estimación de impacto ambiental requiere una cuantificación más precisa. Puede utilizarse esta información para construir un modelo tridimensional de las características geológicas del suelo, la infraestructura y el electrodo. Puede utilizarse la herramienta matemática basada en la técnica



de elemento finito, y otras, para determinar los posibles efectos de interferencia.

Un estudio de interferencia puede ser tan detallado como lo desee el diseñador y las herramientas e información disponibles lo permitan. Es difícil decir a priori qué cantidad de detalles debe considerarse en el modelo antes de que pueda considerarse adecuado. El diseñador puede necesitar hacer varias iteraciones antes de definir el modelo final del problema y sacar conclusiones. La experiencia, el buen juicio e iteraciones suficientes o estudios de sensibilidad pueden llevar a conclusiones razonables. Debido a la naturaleza y la escala del problema y las restricciones ambientales actuales, ningún proyecto debe tratarse como alguno anteriormente desarrollado.

4.3.3 Variables físicas

La naturaleza del comportamiento de la aplicación de corriente en el suelo se puede representar mediante las ecuaciones de Maxwell. En este caso, este comportamiento se puede representar mediante una variante simplificada llamada Modelo electro-cinético. Por otro lado, los impactos ambientales se definen principalmente, de acuerdo con su naturaleza, por diferentes componentes de la ecuación en el mismo dominio de la siguiente manera:

Los impactos causados por el potencial de transferencia se definen por los resultados de potenciales eléctricos.

Los impactos causados por el flujo de CD a través de superficies metálicas se definen por la densidad de corriente.

Los impactos causados por la aplicación de corriente total a través de objetos metálicos se definen por el flujo de corriente.

Estas tres variables están estrechamente relacionadas entre sí, pero es importante comprender que los diferentes impactos ambientales posibles se definen y pueden analizarse y cuantificarse mejor si se considera un factor a la vez. En otras palabras, cada tipo de impacto ambiental tiene variables específicas de interés. Por lo tanto, es importante seleccionar los métodos y herramientas adecuados para estudiar un impacto específico.

Las herramientas matemáticas complejas, como la técnica del "Elemento Finito", pueden funcionar mejor para cuantificar algunas variables, mientras que otras técnicas de cálculo pueden ser mejores para cuantificar otros factores.

Si se necesita una cuantificación precisa del flujo de corriente y del campo eléctrico, se recomienda utilizar herramientas matemáticas que permitan conservar los resultados actuales para calcular con precisión "hacia dónde va la corriente" en lugar de "cuáles son los efectos de la corriente" (elevación de potencial).



Es importante saber interpretar los resultados. Por ejemplo, elevados valores de potencial no necesariamente son peligrosos si no se compromete la integridad física de la infraestructura involucrada o la seguridad de las personas.

Es también importante comunicar a la población civil que los problemas asociados a la infraestructura están relacionados con la circulación de corriente, y no de la elevación de potencial. Sin embargo, la elevación de potencial y los gradientes de potencial están relacionados con el aspecto de seguridad en los seres vivos.

Deben tomarse en cuenta los siguientes factores cuando se planea estimar el impacto de la interferencia:

Desarrollar un modelo de resistividad representativo para un área grande a la profundidad requerida representa una tarea difícil, debido a la gran cantidad de datos, a la incertidumbre inherente a los datos y a la anisotropía (diferentes características según la dirección) de la corteza terrestre. Sin embargo, el comportamiento de la corriente (no el valor absoluto) dependerá principalmente de las diferencias en la conductividad del suelo más que en los valores absolutos. Esto se puede demostrar mediante simulaciones con un modelo de resistividad del suelo adecuado y preciso. Esto hace que sea importante realizar un esfuerzo especial en la definición de conductividades relativas precisas, especialmente en términos de dónde ocurren grandes cambios o variaciones, en lugar de valores de resistividad más precisos. Todo estudio geológico debe considerar este factor.

Antes de considerar medidas de mitigación, las instalaciones de interés (como tuberías, puentes, ferrocarriles, distancia a los transformadores de CA o cables conectados a tierra) deben verificarse para determinar la presencia de corrientes telúricas (corrientes naturales bajo tierra o a través del océano) generadas por los flujos de las mareas o por diferencias potenciales entre masas de tierra (especialmente para cables largos de 100 km o más). Dichas corrientes telúricas preexistentes pueden ser mayores que las corrientes de retorno a tierra calculadas del electrodo de CD parásitas. Si es así, la interferencia del electrodo puede representar una fracción de lo existente por condiciones naturales.

El diseñador debe considerar que los impactos reales solo se conocerán una vez que el electrodo haya sido construido y operado a plena corriente y se hayan tomado y analizado las mediciones. Esto se debe a que cualquier estudio de interferencia es un problema complejo, especialmente teniendo en cuenta que el modelo de resistividad siempre será una aproximación.

La cantidad de variables y las dificultades para realizar las mediciones exactas hacen imposible que los valores encontrados en la operación del electrodo concuerden



perfectamente con los valores calculados antes de la construcción y la puesta en servicio.

Debido a este grado relativamente alto de incertidumbre en el modelado, es útil construir un electrodo de prueba o solo una parte del electrodo completo y operar esto a una corriente reducida. Los electrodos de prueba que proporcionan un área de influencia suficientemente grande pueden no ser fáciles de construir porque la aplicación de la corriente de prueba debe estar entre dos puntos que tienen una distancia equivalente de la zona de interferencia del electrodo. Esto significa una distancia mínima de al menos varios kilómetros entre un punto y otro y puede requerir la construcción de líneas de transmisión entre los dos puntos de aplicación. Si el presupuesto del proyecto y el cronograma lo permiten y si las líneas de transmisión y distribución están disponibles para realizar este tipo de prueba, sería posible tomar medidas que puedan confirmar los resultados del modelado o ajustar el diseño del modelo y el electrodo si es necesario.

De cualquier forma, las pruebas de verificación usando electrodos de prueba pueden ser muy costosas y difíciles de realizar especialmente si es necesario construir nuevas líneas de transmisión que permitan la aplicación de la corriente entre el electrodo de tierra ubicado en un lugar suficientemente remoto, de tal forma que el campo eléctrico alrededor del electrodo refleje el comportamiento real.

4.4 Enlace estación convertidora – EPT

El enlace que transporta la corriente entre el bus de neutros de la estación convertidora y EPT puede realizarse mediante líneas aéreas, cable o una combinación de ambas, y se le conoce como "líneas de enlace".

4.4.1 Enlace mediante líneas aéreas

Este enlace puede realizarse mediante estructuras combinadas (ver Figura 4.8a y Figura 4.8b), o estructuras dedicadas, ver Figura 4.8c. A menudo, las líneas de enlace (identificadas en las figuras como electrodo o neutro) pueden colocarse en la misma torre que los conductores de polo. Las líneas de enlace se instalan frecuentemente en las torres de la línea de HVDC solo por una corta distancia antes de ramificarse en una línea separada, y la decisión de su ubicación (en torres combinadas o separadas) dependerá tanto de consideraciones técnicas y económicas, como en la ubicación del sitio del electrodo en relación con la trayectoria de la línea HVDC [13].

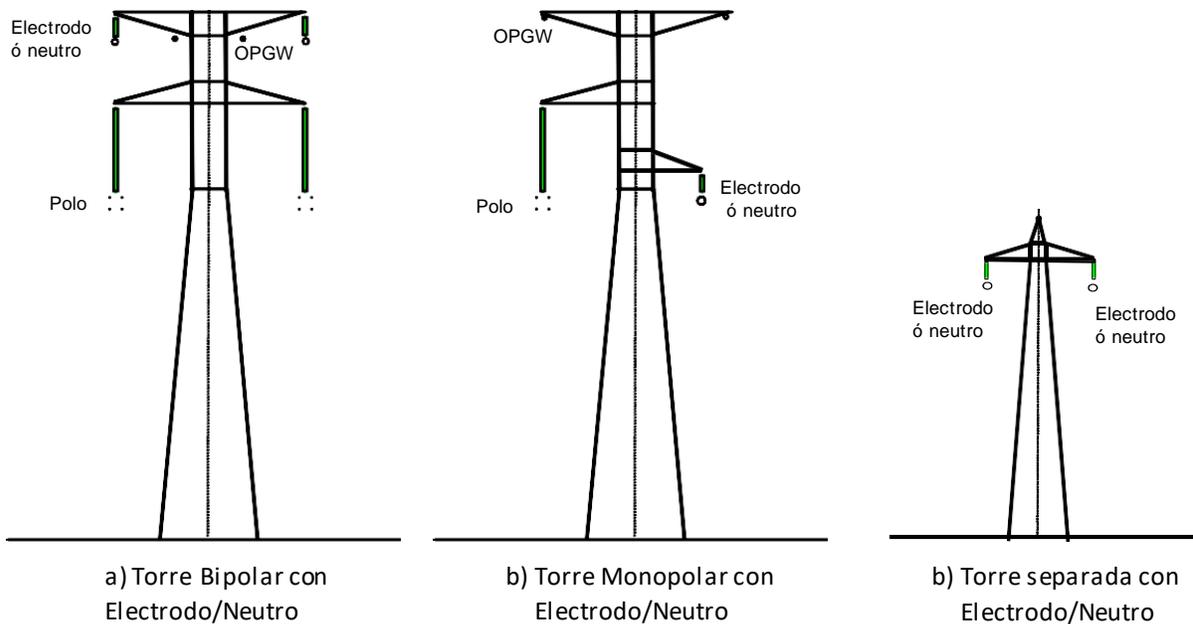


Figura 4.8 Configuración conceptual del enlace mediante líneas aéreas

La capacidad de corriente nominal de la línea de enlace dependerá del modo de operación de la estación convertidora y el tipo de arreglo de los polos (p. ej. bipolar, monopolar con retorno por tierra, monopolar con retorno metálico, con sobrecarga del convertidor, operación en paralelo de dos convertidores en el mismo polo).

Para un esquema monopolar sin un conductor de retorno metálico, la línea de enlace llevaría la corriente en forma continua. Para un esquema monopolar con retorno metálico, un esquema bipolar o un esquema multipolar, la corriente dependerá del modo de operación descrito en el Capítulo 2.

Generalmente, la línea de enlace puede equiparse con los conductores de la misma corriente nominal que los sistemas HVDC o una sección transversal inferior.

En caso de una interrupción de un polo de la línea, los polos del convertidor pueden arreglarse en paralelo. Un polo de línea puede transportar dos veces la corriente nominal de un convertidor en condiciones de emergencia en función del diseño de la temperatura máxima del conductor.

Para evitar las salidas bipolares debido a fallas de los conductores de la línea de enlace, éstos pueden dividirse en dos conductores o haces, para instalarse en dos crucetas independientes normalmente en los lados opuestos de la torre. En este caso, cada conductor o haz de conductores debe tener una corriente nominal suficiente para operar en modo monopolar hasta



el valor nominal de sobrecarga continua inherente del sistema de CD.

Debido a las altas corrientes que fluyen en los conductores, las tensiones en el extremo no conectado a tierra pueden alcanzar valores en el rango de kV's para longitudes de línea típicas y hasta decenas de kV's para líneas extremadamente largas, dependiendo de la longitud de la línea de enlace y la resistencia. Los aisladores utilizados para la línea de HVDC normalmente se usan para la línea de enlace, lo que permite simplificar los requisitos de equipo. En algunos casos, los faldones del aislador se equipan con dispositivos especiales de arco para evitar el arco sostenido cerca de los faldones del aislador que podrían dañar o destruir los aisladores. Debe revisarse con detalle la necesidad en la utilización de este tipo de dispositivos.

Debido a la elevación de potencial de tierra en el sitio del electrodo, debe utilizarse fibra óptica en la conexión del sistema de monitoreo del electrodo (si está instalado) con el control de la estación del convertidor. Aunque la fibra podría incluirse en uno de los conductores portadores de corriente de la línea de enlace, generalmente es más conveniente proporcionar un conductor CGFO (conductor de guarda con fibra óptica) separado. El CGFO necesitaría estar aislado cerca del electrodo para evitar problemas de potencial transferido o corrosión de las bases de la torre debido a las corrientes parásitas resultantes del aumento de potencial del electrodo.

La trayectoria de la línea de enlace depende de la selección final del electrodo y se definiría en detalle después de la selección de la ubicación del sitio del electrodo. Sin embargo, una evaluación preliminar en cuanto a la posibilidad de definir la trayectoria de la línea se realizaría durante el proceso de selección del sitio del electrodo.

4.4.2 Línea de enlace con cable

Normalmente se utilizan conductores aéreos para las líneas de enlace, debido a los costos asociados de obra y mantenimiento. Sin embargo, dependiendo de la aplicación y las circunstancias, se pueden usar cables para algunas partes o toda la línea de enlace. Los cables de tierra se pueden usar para las secciones de línea donde las líneas aéreas no son factibles (por ejemplo, no es posible conseguir el derecho de vía de la línea aérea). Los cables diseñados para media tensión normalmente cumplen con la aplicación. En general, se recomiendan los cables tipo extruidos porque son más livianos y requieren procesos de



instalación y mantenimiento más sencillos. El nivel de aislamiento del cable debe seleccionarse en coordinación con los niveles de aislamiento general de la línea de enlace. Los apartarrayos (supresores de línea) deben instalarse en los puntos de transición del cable para proteger el cable de las sobretensiones debido a las descargas atmosféricas o las sobretensiones del sistema.

La ampacidad del cable debe calcularse con los estándares técnicos correspondientes, incluyendo la resistividad térmica del suelo o agua circundante, la temperatura del medio circundante y la separación de otros cables cercanos (si aplica). La impedancia característica de un cable es menor que el de una línea aérea, por lo tanto, pueden presentarse dificultades en la aplicación de los esquemas de protección y monitoreo de la línea de enlace empleando técnicas de supervisión de alta impedancia, que aplican señal de alta frecuencia en la línea de enlace.

Capítulo 5. DISEÑO DEL ELECTRODO

5.1 Generalidades

La función de un EPT es conducir la corriente del sistema de HVDC de un conductor metálico (aéreo o aislado) a tierra. No funciona como un hilo de protección para el esquema HVDC o para el equipo. El diseño del electrodo de puesta tierra debe considerar los siguientes aspectos:

- Seguridad,
- Criterios físicos de diseño y restricciones,
- Potencial impacto ambiental,
- Posible influencia del funcionamiento del electrodo en otras instalaciones,
- Aspectos prácticos para la construcción del electrodo en el sitio seleccionado.

Estos aspectos serán discutidos en este capítulo. Al igual que el proceso de selección del sitio, el proceso de diseño puede adaptarse o modificarse para diseños individuales. En la Figura 5.1 se muestra un diagrama de flujo conceptual del procedimiento de diseño.

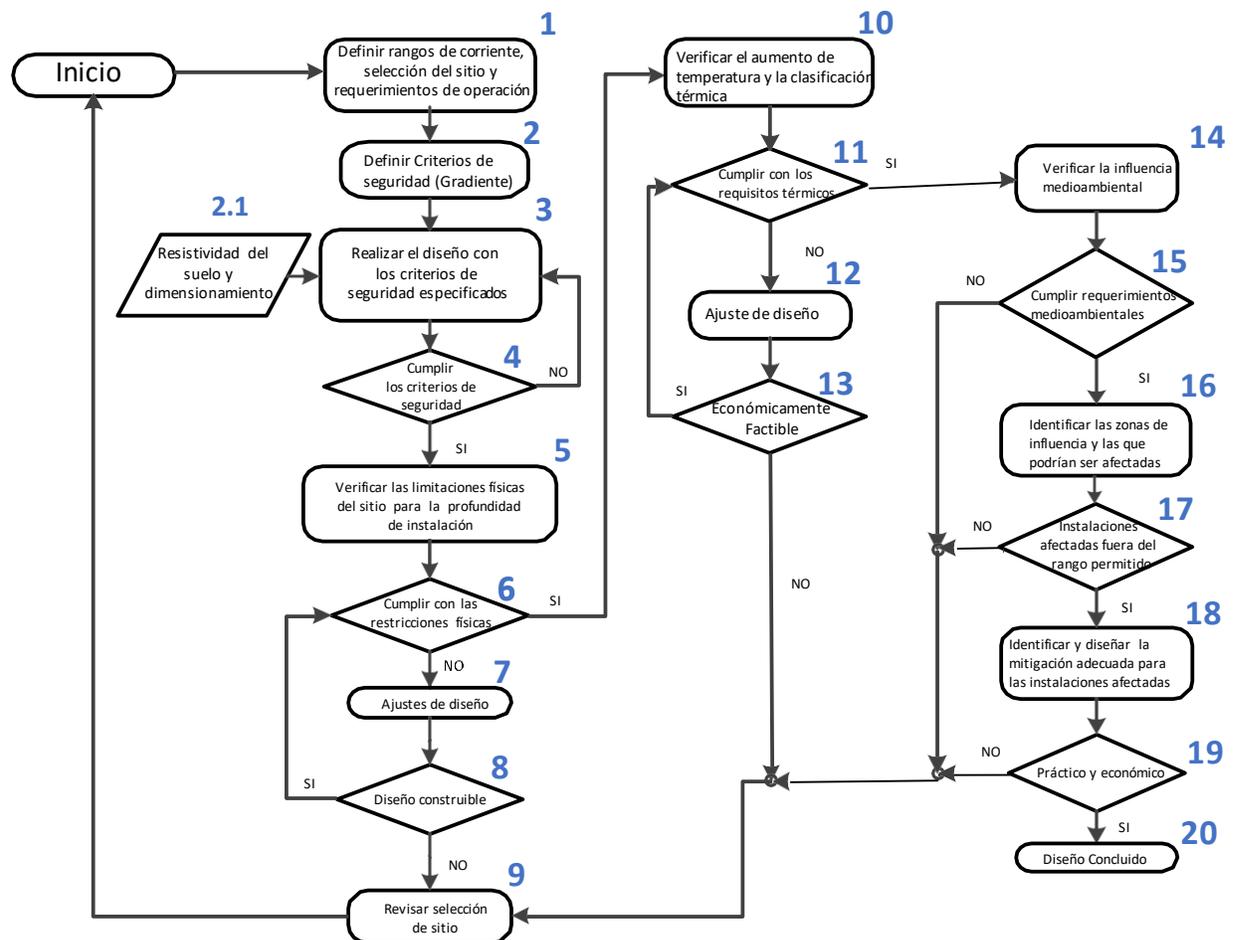


Figura 5.1 Diagrama de flujo conceptual del procedimiento de diseño del electrodo



Los requisitos de seguridad de un EPT se pueden condensar en un solo objetivo de la siguiente manera:

"La operación del electrodo no debe generar condiciones inseguras para personas o animales, ya sea en áreas de acceso público o dentro de áreas controladas accesibles solo para los trabajadores de mantenimiento autorizados".

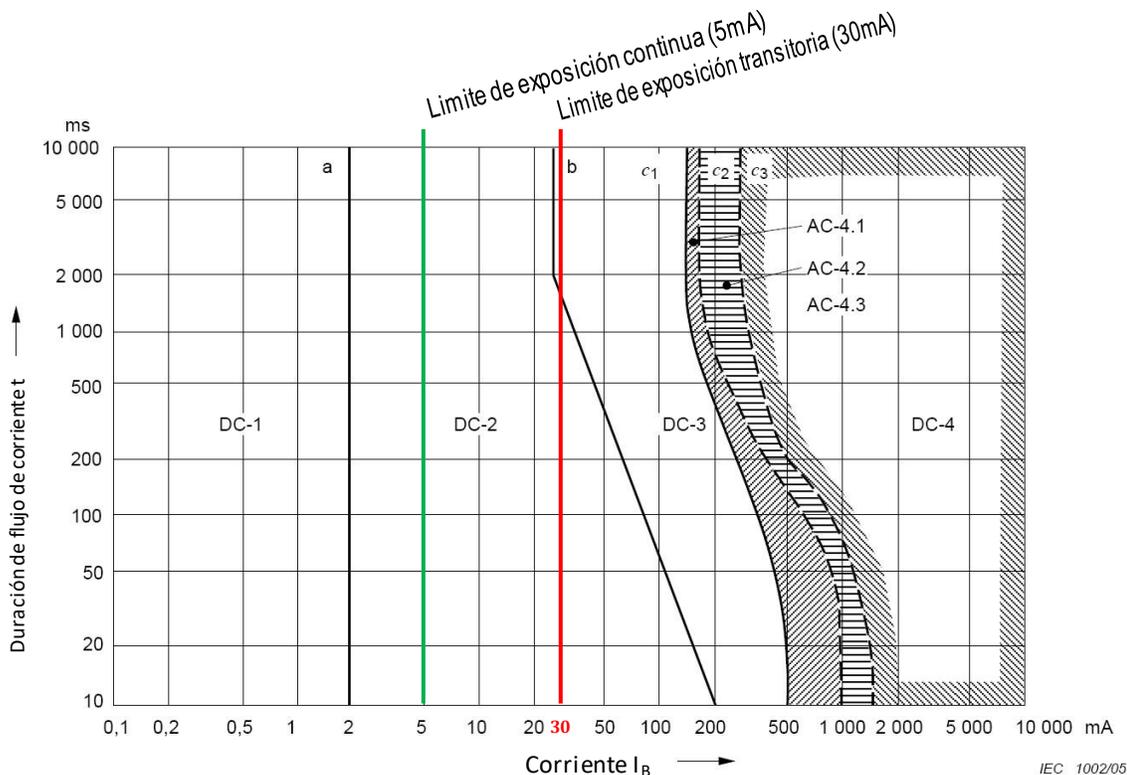
Este objetivo general requiere la consideración de la gama completa de posibles modos de operación del electrodo y la consideración de posibles condiciones e instalaciones dentro de las áreas que pueden ser influenciadas por el electrodo en operación.

Las condiciones de operación consideradas para seguridad se dividen en dos categorías:

1. Condiciones que pueden persistir durante 10 segundos o más, que por razones de seguridad se consideran continuas.
2. Condiciones transitorias que puedan presentarse durante menos de 10 segundos.

En el caso de una falla transitoria en la línea de CD, la corriente transitoria estaría presente hasta la operación del dispositivo de protección (aproximadamente 50 ms), tiempo en el cual se libera la falla.

Los criterios para estas dos condiciones de tiempo son diferentes, ya que la tolerancia del cuerpo humano a la corriente de falla es dependiente del tiempo de exposición. La Figura 5.2 indica la tolerancia del cuerpo humano a la CD.



Zonas	Limites	Efectos psicológicos
DC-1	Hasta 2 mA curva a	Sentir leve cosquilleo, romper o cortar rápidamente el flujo de corriente
DC-2	De 2 mA hasta la curva b	Contracciones musculares involuntarias, especialmente cuando se produce, se rompe o se altera rápidamente el flujo de corriente, pero generalmente no se producen efectos fisiológicos dañinos
DC-3	Curva b y superior	Fuertes reacciones musculares involuntarias y perturbaciones reversibles de la formación o conducción de impulsos en el corazón, la corriente aumenta en magnitud con el tiempo. Generalmente no se espera ningún daño orgánico
DC-4	arriba de la curva c1 c1-c2 c2-c3 fuera de la curva c3	Pueden producirse efectos fisiopatológicos, como paro cardíaco, paro respiratorio y quemaduras u otro daño celular. Probabilidad de fibrilación ventricular que aumentan de magnitud con el tiempo. DC-4.1 Probabilidad de fibrilaciones ventriculares que aumentan aproximadamente hasta 5%. DC-4.2 Probabilidad de fibrilaciones ventriculares que aumentan hasta 50% DC-4.3 Probabilidad de fibrilaciones ventriculares arriba 50%.

Para las raciones de flujo de corriente por debajo de 200 ms, la fibrilación ventricular solo se inicia dentro del período vulnerable si se superan los niveles teóricos relevantes. En lo que respecta a la fibrilación ventricular, esta cifra se relaciona con los efectos de la corriente que fluye en el trayecto de la mano izquierda hacia los pies y hacia la corriente ascendente. Para otras rutas de corriente, se debe considerar el factor de la corriente de paso en corazón.

Figura 5.2 Criterios de seguridad propuestos [25].

Los criterios seleccionados que determinan los límites de diseño de seguridad para los electrodos de puesta tierra se indican en la Figura 5.2. La línea verde es el criterio propuesto



para las condiciones de estado estable (operación continua) y representa un nivel de corriente perceptible pero tolerable, mientras que la línea roja es el límite sugerido de exposición transitoria, que representa el umbral más bajo de la corriente de liberación y que podría generar incomodidad o sensación desagradable, pero cuyo valor sería todavía mucho menor que el umbral de fibrilación, como se indica en las curvas etiquetadas c1 a c3 de la Figura 5.2. En un sistema LCC - HVDC, no se espera que las corrientes transitorias persistan durante más de 50 ms debido a la operación de los dispositivos de protección del sistema de control HVDC. El uso de valores únicos de corriente para los límites de diseño continuo y transitorio en lugar de curvas resulta conveniente para la simplificación de los cálculos de diseño.

Los límites seleccionados con un valor único proporcionan márgenes de seguridad más convenientes para las zonas de “soltar” y de “fibrilación ventricular”.

La sensibilidad de los adultos a la CD se ha estudiado con resultados confirmados, pero hay muy pocos datos sobre los niños. Se sabe que el umbral de percepción y las corrientes de “soltar” son menores en las mujeres que en los hombres y se espera que en los niños sean ligeramente más bajos que las mujeres [26].

5.1.1 Métricas y criterios de seguridad

La seguridad de humanos y animales en un sitio donde se encuentra instalado el electrodo de tierra representa un tema de interés, principalmente dentro del área donde se tienen potenciales y gradientes de potencial elevados, generados durante la operación del electrodo. En el caso de que existan cuerpos de agua dentro del área de influencia del electrodo, la seguridad en el agua y en la interfaz agua / suelo requerirá considerar las corrientes expuestas para humanos y animales que puedan estar presentes en el agua.

La seguridad se puede definir en términos de las siguientes tensiones (utilizando las definiciones de IEEE Std. 80 [27] y modificándolas para reflejar el carácter especial y las características de funcionamiento de los electrodos de puesta a tierra HVDC).

- a) Tensión de paso.
- b) Tensión de contacto.
- c) Tensión de contacto metal-metal.
- d) Tensión transferida o potencial transferido.
- e) Gradiente de potencial en el agua.

A pesar de la necesidad de evaluar las tensiones indicadas, es importante indicar que los valores aceptables de seguridad están en función de los niveles de corriente que circula en el cuerpo del ser vivo (persona o animal) sin representar un riesgo para su integridad física.



Generalmente, se considera que los niveles aceptables de corriente dentro del cuerpo son corrientes que están por encima del umbral de percepción pero que están por debajo del nivel de “soltar” y muy por debajo de la corriente de “fibrilación ventricular”. Estas magnitudes de corriente pueden ser lo suficientemente grandes como para causar molestias a la persona o al animal, pero no serían suficientes para poner en peligro la vida o causar lesiones.

Generalmente, los criterios de seguridad para los electrodos se definen usando niveles aceptables de CD dentro del cuerpo. La única excepción a esto es la consideración de la máxima corriente de falla transitoria del electrodo, que tiene una corta duración y puede caracterizarse como una corriente alterna o corriente de pulso superpuesta a un nivel de CD. La tolerancia del cuerpo al flujo de corriente es una función de la frecuencia de la corriente, y los valores aceptables de la CD en el cuerpo son más altos que los valores correspondientes de la corriente de CA (50 Hz o 60 Hz) [25], [13].

Por conveniencia en el diseño de electrodos, generalmente es deseable poder trabajar con límites de tensión o límites en gradientes de potencial que puedan calcularse y verificarse más fácilmente mediante mediciones. En consecuencia, los valores seguros o aceptables se determinan utilizando los niveles aceptables de corriente en el cuerpo considerando valores conservadores de resistencia de contacto y resistencia del cuerpo humano.

Los programas de software disponibles deben ser capaces de calcular la elevación de potencial en la superficie del suelo en el sitio, con un grado de precisión aceptable, y el criterio utilizado debe incluir un margen suficiente para que los cambios posteriores al diseño no representen un detrimento en los criterios de seguridad.

Todos los criterios de seguridad discutidos pueden derivarse de los niveles de elevación de potencial y de gradientes de potencial asociados en la superficie del suelo.

De los criterios anteriores, solo los dos últimos pueden extenderse a distancias significativas hacia áreas de acceso público:

- 1) Potencial transferido.
- 2) Gradiente de potencial en el agua.

Las tensiones de paso que se aproximan a los límites normalmente están confinadas en el área del sitio del EPT. Como el público en general puede violar las cercas de restricción, los valores calculados deben ser predecibles y conservadores.

Como se señaló anteriormente, los límites reales de seguridad están relacionados con la corriente que circula en el cuerpo de la persona o animal, pero los criterios aplicados para la evaluación son los potenciales y los gradientes de potencial. El criterio más limitado de los valores calculados será el que determine los valores de diseño por aspectos de seguridad.



Al calcular los criterios de tensión aceptables para el diseño del electrodo, es necesario hacer suposiciones con respecto a la resistencia del cuerpo y la resistencia de contacto entre el cuerpo y la tierra o el objeto energizado. Existen algunas diferencias entre la IEC 60479-1 y la IEEE Std 80 en este aspecto, pero la metodología de cálculo de la IEEE es más fácil de aplicar para la resistencia del cuerpo y las resistencias de contacto en serie con la resistencia del cuerpo de la siguiente manera:

- Las resistencias de contacto y de mano-pie son iguales a cero.
- Las resistencias de guantes y zapatos son iguales a cero.

El valor de la resistencia del cuerpo humano puede aproximarse mediante una sola resistencia con un valor de 1000Ω . Este valor se usa para representar la resistencia de un cuerpo humano (mano-pie, mano-mano, pie-pie).

Es decir, $R_B = 1000 \Omega$.

Se considera que la resistencia de contacto de un pie a tierra es la misma que la de un disco metálico que representa el pie. El pie se representa como una placa circular con un radio "b" de 0,08 m. Por tanto, la resistencia de cada pie a tierra (R_f) será:

$$R_f = \frac{\rho_s}{4b} = 3,125 * \rho_s \quad (5.1)$$

Las suposiciones anteriores son consistentes con las suposiciones hechas en la IEEE Std. 80 relacionado con la seguridad en el diseño de una subestación en CA.

El valor de la resistencia del cuerpo para los animales es en general diferente al de los humanos, y los niveles tolerables de corriente también pueden ser diferentes para diferentes especies de animales. Sin embargo, los métodos de cálculo y los diagramas conceptuales que se muestran a continuación son exactamente los mismos para las personas y los animales.

La nomenclatura utilizada es:

IBc	corriente del cuerpo en condiciones continuas (A)
IBt	corriente del cuerpo en condiciones transitorias (A)
RB	resistencia del cuerpo (Ω)
Rf	resistencia de contacto entre el pie y el suelo (Ω)
Es	voltaje de paso (V)
Esc	tensión de paso en condiciones continuas (V)
Est	tensión de paso en condiciones transitorias (V)
Et	tensión de contacto (V)
Etc	tensión de contacto en condiciones continuas (V)
Ett	tensión de contacto en condiciones transitorias (V)
Ewc	tensión continua en agua (V)
Ewt	tensión en agua bajo condiciones transitorias (V)
ρ_s	resistividad superficial en el sitio del electrodo ($\Omega \cdot m$)

Las distancias generalmente aplicadas para la determinación de condiciones aceptables para las tensiones de paso, contacto, metal-metal y agua son 1m, 1.25m y 2m como se ilustra en la Figura 5.3 y Figura 5.5. El diseñador puede aplicar márgenes de seguridad adicionales si así lo desea. La distancia no está definida en el caso de los potenciales transferidos, como se indica en la Figura 5.4.

Los gradientes se pueden determinar a partir de los valores de las tensiones dividido por las distancias.

5.1.2 Tensiones de paso, contacto y metal-metal

Las tensiones de paso deben limitarse a valores que no excedan los siguientes criterios: Las tensiones de paso/contacto en áreas de acceso público en condiciones de funcionamiento continuo no deben superar un valor que genere corrientes corporales por encima del umbral de percepción. ($I_{Bc} < 5 \text{ mA}$). Las tensiones de paso/contacto durante corto tiempo y bajo condiciones de falla y transitorios no deben exceder un valor que generen corrientes corporales que excedan el umbral más bajo de la corriente de liberación. ($I_{Bt} < 30 \text{ mA}$).

La tensión de paso, la tensión de contacto y la tensión de toque metal-metal correspondiente a estos criterios, así como las expresiones para una tensión de paso aceptable se ilustran en la Figura 5.3.

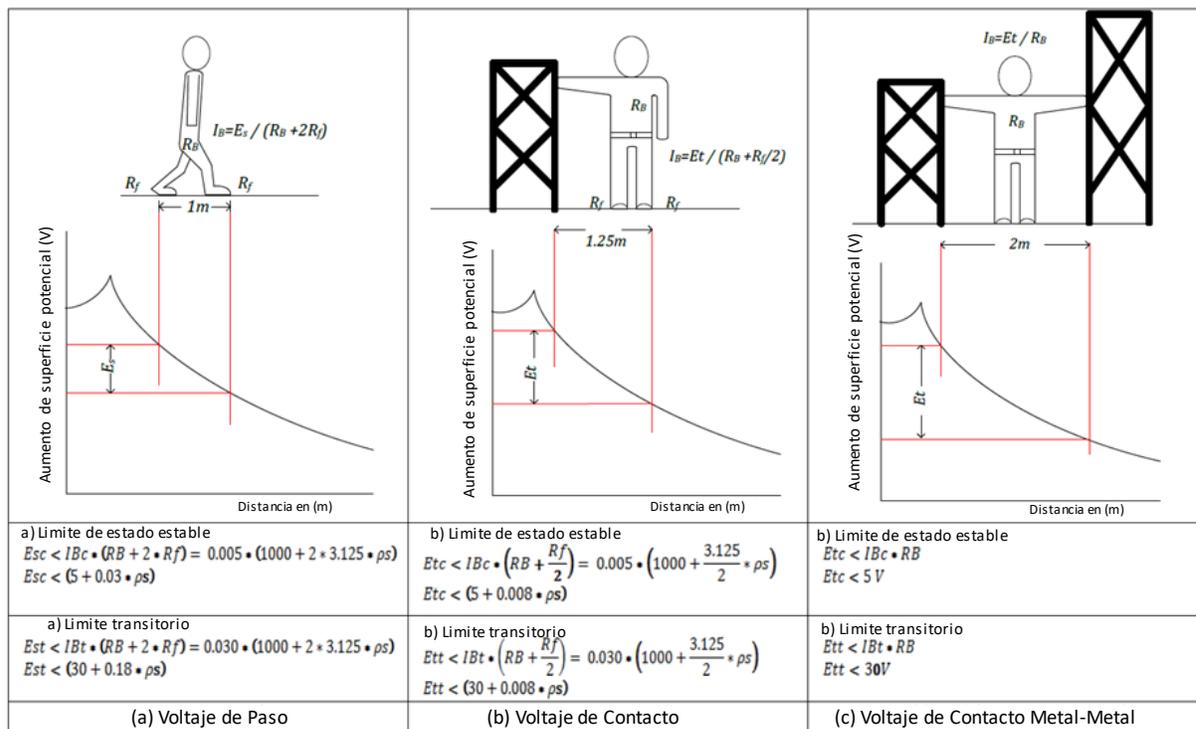


Figura 5.3 Figura conceptual de la tensión de paso, tensión de contacto y tensión de contacto metal-metal y el correspondiente criterio de seguridad [13].

5.1.2.1 Potencial transferido

El potencial transferido es un caso especial de tensión de contacto y, por lo tanto, se aplican los mismos límites de corriente corporal y los límites de tensión continua y de transitorios asociados. Sin embargo, en este caso, la distancia puede ser cualquier valor no especificado. Los potenciales transferidos pueden estar presentes en objetos metálicos o cables que se encuentran en el sitio y que pueden conectarse a tierra en un punto y flotar en otro punto. El concepto de potencial transferido se ilustra en la Figura 5.4.

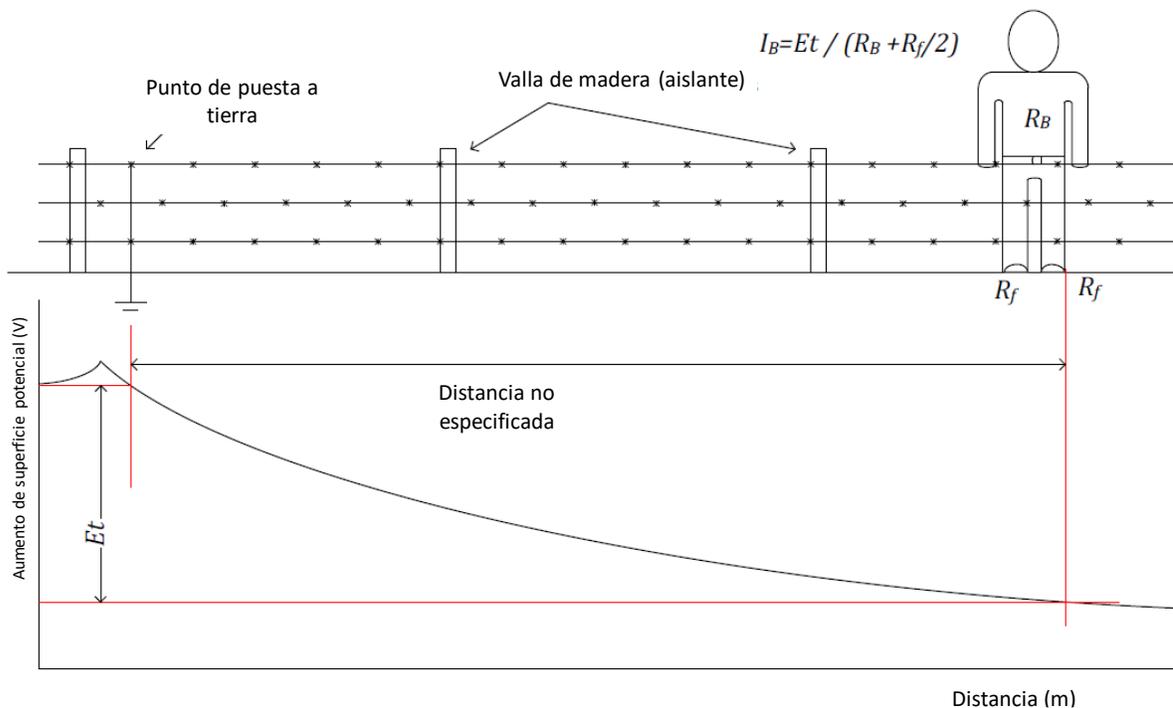


Figura 5.4 Concepto de potencial transferido [13].

Los cables metálicos que entran o salen del sitio o cercas metálicas cerca del sitio también pueden representar un riesgo de potenciales transferidos.

Se considera que la resistencia del objeto metálico y la conexión del objeto a tierra es mucho menor que la resistencia del cuerpo (prácticamente cero) y que la resistencia de los postes de madera es muy grande (prácticamente infinita).

La mitigación de los potenciales transferidos en cercas metálicas se logra normalmente mediante la “partición” de la cerca para limitar el potencial transferido a niveles seguros. Para evitar longitudes muy cortas de la cerca metálica en la partición, el criterio para el potencial transferido debe seleccionarse con base en el límite de corriente transitoria en lugar del umbral de percepción.

El riesgo de potenciales transferidos no puede eliminarse por completo mediante el diseño, pero se puede reducir adoptando las siguientes medidas y procedimientos de diseño:

- Restringir el acceso a personal autorizado.



- Elaboración de procedimientos de "trabajo en vivo" para mantenimiento, que consideren y mitiguen el riesgo de potenciales transferidos.
- Utilización de transformadores de aislamiento en el cableado metálico que ingresa o sale de los transformadores del sitio para evitar la transferencia de potencial a ubicaciones remotas.
- Utilizar transformadores sin conexión a tierra en el lado primario para servicios propios de la estación.
- Evitar la colocación de cercas metálicas en lugares con elevados perfiles o gradientes de potencial. Si es necesario cruzar un área con estas características, se deben instalar juntas aislantes en cada partición o sección de la cerca metálica para mantener el potencial transferido a un nivel aceptable.
- En caso de instalar una cerca perimetral, debe seguirse el contorno de los perfiles de potencial esperados del electrodo.
- Incluso cuando se respeten las disposiciones d) y e), los postes de las cercas no deben ser de acero, sino de hormigón o fibra de vidrio, y la malla o alambre debe inspeccionarse regularmente para detectar corrosión y repararse si es necesario.

Los potenciales de transferencia más altos que pueden presentarse en el sitio serían iguales a la diferencia entre los valores máximo y mínimo del potencial de tierra en el sitio. El potencial de transferencia máximo ocurrirá en las condiciones transitorias y de sobrecarga de corto tiempo. Este tema es tan extenso que podría surgir otro trabajo de investigación para modelar los potenciales transferidos del EPT.

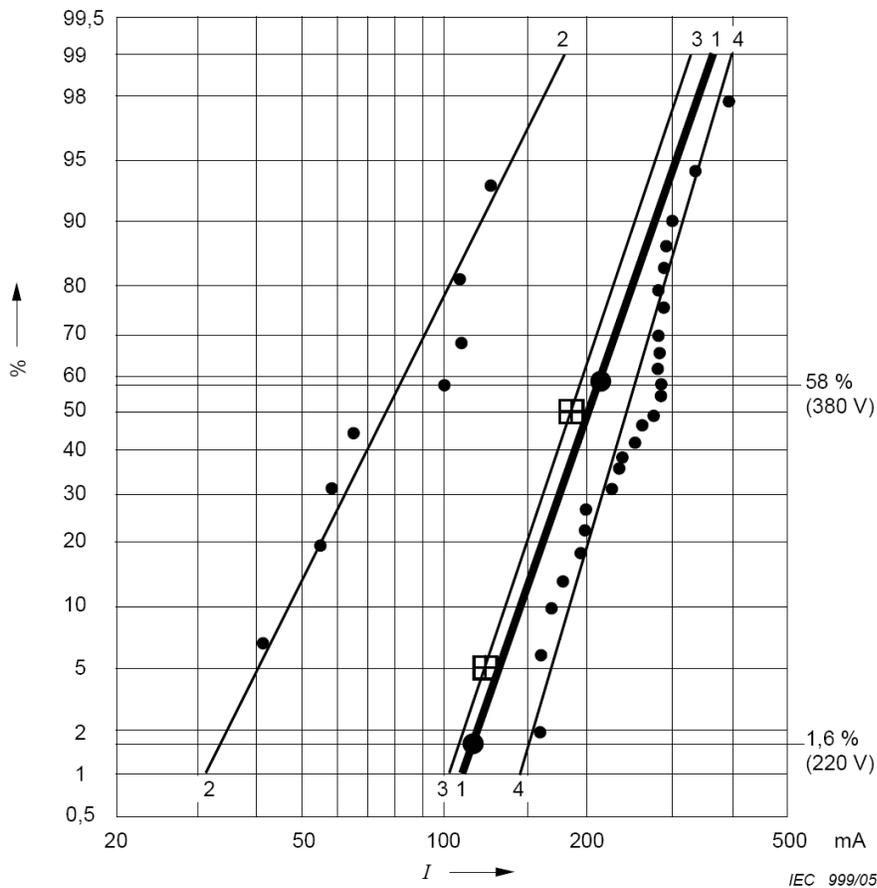
5.1.2.2 Gradientes eléctricos en el agua

Los gradientes eléctricos en el agua pueden generar un flujo de corriente en los cuerpos de los humanos que están nadando en el agua. Para garantizar gradientes de potencial seguros en el agua, debe limitarse a valores que no excedan los siguientes criterios:

Bajo condiciones de operación continua, el umbral de percepción del humano a la corriente que pasa por su cuerpo debe ser $IBc < 5 \text{ mA}$ en sitios públicos.

Bajo condiciones transitorias y de sobrecarga de corto tiempo, el umbral de percepción del humano a la corriente que pasa por su cuerpo debe ser $IBt < 30 \text{ mA}$.

Los gradientes de potencial correspondientes a estos criterios se ilustran conceptualmente en la Figura 5.5. Como la tensión total aparece en 2 m, el gradiente debe limitarse a la tensión total permitida dividida por 2. Por lo tanto, los gradientes de tensión en el agua deben limitarse a $2,5 \text{ V/m}$ para condiciones de funcionamiento continuo y a menos de 15 V/m bajo fallas



Key

- 1 Datos de fibrilación para personas calculados a partir de estadísticas de accidentes ($U_T=220\text{ V}$, 1.6%, $U_T=380\text{ V}$, 58%)
- 2 Datos de fibrilación para perros, duración de flujo de corriente 5 s
- 3 Datos de fibrilación para cerdos, duración de flujo de corriente $t > 1.5$ *Periodo Cardiaco
- 4 Datos de fibrilación para ovejas, duración de flujo de corriente 3s
- ⊙ Valores calculados a partir de estadísticas de accidentes ($U_T=220\text{ V}$, 1.6%, $U_T=380\text{ V}$, 58%, $I_T=110\text{ mA}$ y 220 mA respectivamente)(1)
- ⊕ Valores estadísticos de mediciones con cerdos ($I(5\%)=120\text{ mA}$, $I(50\%)=180\text{ mA}$)
- (1) Valores corregidos con el factor de paso de corriente en el corazón $F=0.4$

Figura 5.6 Comparación de corrientes de fibrilación de humanos y animales [25].

La Figura 5.6 indica que las corrientes de fibrilación de CA (50 o 60 Hz) para ovejas y cerdos son similares a las de los humanos (y se esperaría que a las vacas también), mientras que los perros son ligeramente más sensibles.

Los animales más pequeños, como las aves, tienen una longitud de paso y un tamaño mucho más pequeño que los animales mencionados, lo que implica una mayor resistencia interna, por lo que podrían teóricamente tolerar tensiones de paso y contacto más altos para los mismos límites en las corrientes internas del cuerpo. Los experimentos han demostrado



diferencias de tensión de paso y contacto de hasta 18 V que no tienen ningún efecto sobre el rendimiento de producción y el comportamiento de las gallinas ponedoras. Se espera que las aves más pequeñas sean capaces de tolerar incluso gradientes de potencial más altos. Se estiman gradientes mucho más bajos cerca de los electrodos de operación y, por lo tanto, no se esperaría ningún impacto en la anidación de aves.

En el proceso de diseño del electrodo, las corrientes del cuerpo resultantes del contacto, de paso y los potenciales transferidos se limitarían a 5 mA de forma continua y 30 mA durante las condiciones transitorias. Se tiene conocimiento que las corrientes de CA mínimas que causan fibrilación en algunas especies de animales domésticos son aproximadamente diez veces más altas que estos valores, como se muestra en la tabla de la Figura 5.6. Por lo tanto, los valores que deben considerarse en el diseño del electrodo están muy por debajo de las corrientes de fibrilación para humanos o animales y no habría duda sobre la seguridad de los animales durante la operación del electrodo.

5.1.3 Criterios de diseño físico y restricciones

5.1.3.1 Condiciones operativas del electrodo

Para un sistema de transmisión bipolar, las condiciones operativas del electrodo se basan en:

- a) Las salidas de interrupción esperadas del polo para la operación monopolar del sistema HVDC.
- b) La corriente de desbalance bipolar durante el funcionamiento normal.
- c) El factor de carga del sistema
- d) Las configuraciones de funcionamiento planeadas el sistema de transmisión HVDC.

Estas tareas tendrían impactos acumulativos de corrosión en la infraestructura circundante y darían como resultado la pérdida de material del elemento del electrodo debido a la corrosión. El diseño del electrodo debe ser tal que los elementos del electrodo sean capaces de sostener la operación durante el ciclo de vida del proyecto o puedan ser reemplazados a intervalos cuando sea necesario. En general, las tareas de operación se minimizarían para limitar el impacto de corrosión en la infraestructura dentro de la zona de influencia del electrodo.

Las condiciones operativas para un esquema monopolar dependen principalmente de lo siguiente:

1. Corriente máxima y operación anual en amper-hora.
2. Ciclo de vida del proyecto.
3. Un arreglo bipolar o multipolar implica una revisión exhaustiva de los modos de operación y las corrientes de tierra asociadas, y cualquier contingencia importante.



Los parámetros a evaluar incluyen:

1. Corriente máxima, incluyendo condiciones continuas y de sobrecarga de corto tiempo en un arreglo monopolar.
2. Ciclo de vida del proyecto.
3. Factor de carga durante la operación monopolar, que depende de la demanda de carga.
4. Tiempo de interrupción forzada del polo, que genera una operación de retorno por tierra o un alto nivel de desbalance de la corriente. Normalmente se especifica como parte del convertidor o especificación del sistema y el tiempo promedio de interrupción se considera con base en los datos publicados.
5. Tiempo de interrupción programada del polo, que genera una operación de retorno por tierra o un alto nivel de desbalance de la corriente.
6. La confiabilidad y la disponibilidad de la línea de transmisión, especialmente su comportamiento ante los efectos del rayo, que genera una operación de retorno por tierra.
7. Corriente de desbalance bipolar o monopolar en estado estable del sistema.
8. Operación de retorno por tierra durante la etapa de instalación y puesta en marcha.
9. Fallas importantes del equipo que pueden dar como resultado una operación monopolar en grandes períodos de tiempo. (por ejemplo, cable submarino o transformador convertidor).

En algunas jurisdicciones, se imponen límites máximos de amper-hora de operación de retorno por tierra para minimizar el impacto de corrosión en la infraestructura (por ejemplo, tuberías). En algunos países, la corriente de retorno por tierra está prohibida y, por lo tanto, se debe proporcionar un retorno por neutro específico o retorno metálico utilizando el otro conductor. En ausencia de documentos locales de regulación para la amplitud y duración de la corriente de CD en los sistemas que operan con retorno por tierra, pueden utilizarse los siguientes valores [6]:

La amplitud de la corriente nominal del electrodo de tierra es igual a la corriente nominal del sistema (I_N). La duración máxima de esta corriente corresponde al modo de operación monopolar con retorno por tierra. Para un sistema bipolar, el intervalo del tiempo se considera desde la puesta en servicio del sistema monopolar hasta el momento en que se activa el sistema bipolar.

La amplitud de la corriente de sobrecarga máxima es típicamente de $1,1 \sim 1,3 I_N$. La máxima duración de esta corriente es generalmente el tiempo permitido para la operación a la



sobrecarga máxima después de poner en servicio el equipo de enfriamiento

La amplitud de la sobrecorriente transitoria máxima se determina a través del cálculo de la estabilidad del sistema, típicamente en el rango de 1,25 ~ 1,5 I_N . La duración máxima generalmente es de 1 s hasta algunos segundos.

La amplitud de la corriente de desbalance es la diferencia de las corrientes de operación de los dos polos. Para sistemas con dos polos operados simétricamente, este valor es muy pequeño, típicamente 1% de I_N . La duración de la CD por tierra es la misma que el tiempo de operación del EPT en modo bipolar.

5.1.3.2 Ciclo de vida del proyecto

Debe revisarse el ciclo de vida del proyecto del enlace HVDC para definir cualquier actualización futura que deba considerarse como parte del diseño del electrodo de tierra, y la idoneidad de la infraestructura del electrodo de tierra para operar a su corriente nominal y para mantener el entorno en el que se construirá.

Deben incluirse disposiciones en el diseño de los elementos de conexión a tierra y los circuitos de distribución para cualquier aumento futuro de la capacidad. El reemplazo de los elementos consumibles (por ejemplo, para el electrodo de tierra tipo estanque) debe considerarse al desarrollar los detalles de diseño, si corresponde.

Los electrodos también están en riesgo por eventos ambientales. Los electrodos terrestres deben resistir los eventos de viento e inundación. La infraestructura del electrodo marino y costero debería diseñarse para soportar las peores condiciones de marea y oleaje.

El diseño de un EPT generalmente debe permitir la construcción y operación de convertidores asociados en una serie de pasos. La vida útil de diseño deberá ser la misma que la de la estación convertidora usando este EPT. Cuando no se especifique la esperanza de vida útil del EPT, ésta deberá ser de más de 30 años [6].

5.1.3.3 Confiabilidad

El electrodo de tierra y sus conexiones a la estación convertidora impactan la confiabilidad general del enlace HVDC, donde la trayectoria de retorno por tierra es requerida para las corrientes de desbalance, corriente de polo continuo o durante una falla del polo. La confiabilidad del electrodo y de la línea de enlace representa un factor clave en la confiabilidad general del enlace HVDC.

Un EPT no involucra partes móviles, por lo que la probabilidad de falla es baja si los circuitos de distribución y los elementos están diseñados con márgenes adecuados y protegidos del ambiente. Sin embargo, se pueden esperar algunos problemas debido a la tolerancia del



material y las condiciones de campo desconocidas (capacidad térmica del suelo y salinidad del agua) normalmente no consideradas en el diseño.

La confiabilidad de un EPT puede aumentarse si la instalación se divide en secciones con interruptores de desconexión de aislamiento separados para secciones individuales, y se dispone de una disposición de conductores múltiples para la conexión al bus de neutros del convertidor. Esto proporciona los medios para aislar cualquier elemento defectuoso para permitir el mantenimiento mientras el EPT está funcionando.

Dependiendo del diseño, la interrupción de una porción del electrodo puede limitar la capacidad del esquema. La restricción de capacidad puede considerarse si se incluye una subsección de electrodo redundante (por ejemplo, un electrodo requiere 45 elementos, al instalar 54 elementos en 6 subsecciones se facilitará el funcionamiento a plena capacidad con una sección retirada para mantenimiento). Un sistema de monitoreo del sitio y un programa de mantenimiento preventivo ayudan a identificar cualquier eventualidad en proceso y el robo/destrucción de la infraestructura.

5.1.3.4 Polaridad anódica y operación catódica

La polaridad de un electrodo de tierra se especifica como catódica, que indica el flujo de corriente de la tierra al electrodo, o anódica, que indica el flujo de corriente desde el electrodo a tierra. Para un esquema en el que la dirección del flujo de corriente a través de la trayectoria de retorno por tierra permanece igual, los electrodos se pueden diseñar como un ánodo y un cátodo según corresponda. En caso de que la dirección del flujo de corriente cambie periódicamente, los electrodos deberían ser del tipo reversible y tener la capacidad de funcionar como un ánodo y como un cátodo. Cuando no se especifique la polaridad, el diseño del electrodo debe considerar su operación como anódica.

Se requiere que el EPT asociado con un arreglo bipolar sea reversible ya que la dirección del desbalance bipolar y la corriente monopolar bajo una corriente de interrupción del polo se puede revertir. Los arreglos monopolares pueden tener electrodos de puesta a tierra reversibles o no.

La polaridad del EPT es un aspecto clave en la selección de los tipos de elementos. Además, la polaridad es el factor principal para determinar la huella de emisión química de un electrodo. Para electrodos de tierra de tipo anódico, deberá considerarse la corrosión del material del EPT, así como la corrosión en el otro extremo de una estructura metálica de gran longitud ubicada cerca del EPT. Para electrodos de puesta a tierra de tipo catódico, debe considerarse la corrosión de estructuras metálicas enterradas cerca del electrodo de tierra [6].



5.1.3.5 Densidad de corriente

La densidad de corriente en la superficie del elemento del electrodo (entre el coque y el suelo) debe seleccionarse de tal forma que no se presente electro-ósmosis en los electrodos terrestres (con un valor máximo en el rango de 0.5 a 1 A/m²) [6], particularmente cuando el electrodo opere en modo monopolar con tiempos largos de trabajo, y para reducir la selectividad del cloro en los elementos en contacto con el mar en los electrodos de playa y mar (con un valor máximo en el rango de 6 a 10 A/m²).

Las densidades de corriente más altas pueden considerarse para arreglos bipolares en electrodos de estanque donde el acceso de personas y animales es restringido. En este caso, la densidad de corriente puede ser de hasta 2 A/m² [6]. Sin embargo, incluso en esta situación de restricción, una densidad de corriente más baja daría como resultado una menor selectividad del cloro y un consumo reducido de electrodos, y ambos aspectos deberían revisarse para el tipo de elementos utilizados.

5.1.4 Impactos potenciales ambientales y de infraestructura

5.1.4.1 Elevación de Potencial en Tierra (“GPR” Ground Potential Rise)

La CD aplicada en tierra (operación anódica) o recogida de tierra (operación catódica) genera una GPR en el electrodo en relación con el área circundante. La magnitud y distribución de la GPR es una función de la corriente y la resistencia del electrodo a la tierra remota. La resistividad del suelo o cuerpo de agua local y la configuración del elemento de conexión a tierra son los principales factores determinantes de la GPR cerca del sitio de conexión a tierra. Los elementos de puesta a tierra con un área de contacto grande darán como resultado una GPR menor, así como un EPT del enlace HVDC instalado en suelo de baja resistividad o agua de mar, generará gradientes de potencial o tensiones de paso menores.

Sin embargo, a una distancia significativa del electrodo fuera de la zona de influencia, la distribución de la GPR no se verá afectada por las condiciones del suelo local o la disposición de elementos en el sitio de conexión a tierra. La resistividad de tierra remota determina la distribución de la GPR fuera de la zona de influencia. La distribución de la GPR en la ubicación del electrodo de tierra determina las tensiones de paso y, en consecuencia, la seguridad. Los campos eléctricos resultantes de la operación del electrodo pueden tener efectos en la infraestructura circundante, que son principalmente interferencia eléctrica (aplicable principalmente para transformadores y máquinas con conexión a tierra en estrella) y corrosión electrolítica (aplicable para infraestructura metálica enterrada o inmersa en agua).



5.1.4.2 Impacto de interferencia eléctrica y corrosión

El sitio seleccionado del EPT debe considerar niveles bajos de interferencia eléctrica. Se deben considerar las medidas de mitigación cuando no es viable ubicar el sistema de transmisión y distribución alejado del electrodo.

Los gradientes de potencial escarpados a lo largo de una estructura metálica causada por el campo eléctrico de la corriente del sitio de conexión a tierra causarán corrosión cuando las corrientes parásitas abandonan la estructura (es decir, la ubicación anódica o la extremidad de la estructura metálica). La corrosión de las estructuras metálicas se puede mitigar de diferentes maneras, como agregar material adicional a los ánodos de sacrificio, introducir juntas aislantes o proporcionar sistemas de protección catódica de corriente impresa (ICCP por sus siglas en inglés).

5.1.4.3 Campo magnético

El campo magnético de los cables del electrodo y el elemento de un estanque o un electrodo de mar puede causar desviación de la brújula o afectar a las especies magneto-sensibles en el mar. Normalmente, el campo magnético a una distancia del cable o de los elementos de conexión a tierra es débil y no representa un problema de diseño. El campo magnético debe cuantificarse y los hallazgos deben comunicarse para una evaluación adicional por parte de la autoridad de transporte y los grupos de evaluación ambiental.

5.1.5 Factibilidad de construcción

Una evaluación de factibilidad de construcción del sitio de ubicación del electrodo terrestre debe considerar lo siguiente:

Accesibilidad del sitio por carretera, ferrocarril o agua para el transporte de equipos y materiales.

La posibilidad de construir la línea de enlace en el sitio.

El sitio debe estar relativamente nivelado.

El sitio no debe ser excesivamente húmedo o blando.

El sitio no debe estar sujeto a inundaciones repentinas o en riesgo de erosión o deslizamientos de tierra.



5.1.6 Datos requeridos para el diseño

5.1.6.1 Corriente

La corriente de HVDC que pasa a través del EPT es el parámetro principal para su clasificación. La corriente que pasa a través de un sitio de conexión a tierra es una función del diseño del enlace de HVDC y sus configuraciones operacionales. Para garantizar su rendimiento eléctrico, el electrodo debe tener el tamaño adecuado para la corriente mientras se mantienen las densidades de corriente del elemento del electrodo dentro de los límites recomendados. Los factores de operación y mantenimiento que se deben considerar incluyen el mantenimiento de una subsección del electrodo durante el funcionamiento y la seguridad para acceder a los elementos del electrodo para su inspección y mantenimiento.

Las corrientes del sistema (continua, sobrecarga de corta duración y transitoria) forman la base del diseño de un sistema de electrodos [13], [28].

La corriente del EPT para un arreglo bipolar o un arreglo multipolar depende del modo de operación del arreglo. Para una operación bipolar o multipolar equilibrada, la corriente de retorno por tierra es una pequeña corriente de desbalance del orden del 1% de la corriente polar nominal. Bajo una contingencia de una interrupción del polo, la corriente de retorno por tierra podría ser igual o mayor que la corriente del polo nominal.

La corriente de tierra puede ser tan alta como 200% durante un corto período de tiempo para soportar los sistemas de CA y, para diseños con corrientes de sobrecarga, puede llevar corriente continuamente más alta que la corriente nominal del polo. El electrodo de tierra debe diseñarse para cumplir con los requisitos de seguridad para la máxima sobrecorriente transitoria de los electrodos.

Pueden presentarse armónicos en la trayectoria de retorno por tierra para configuraciones bipolares y monopolares, pero éstos son reducidos a valores tolerables en la estación convertidora con filtros adecuados, y no forman parte del diseño del electrodo.

La magnitud de la corriente de retorno por tierra asociada con una falla de línea de CD depende de la impedancia del transformador convertidor, la resistencia al arco de CD y la impedancia de conexión a tierra de la línea en la ubicación de la falla. La corriente se suprime en un esquema de LCC por acción de control y se debe revisar para el diseño del EPT. Para un esquema de VSC, la falla se libera aislando la terminal del convertidor del sistema de CA o del sistema de CD; la corriente de falla se debe evaluar por seguridad en el [6].



5.1.6.2 Propiedades físicas y químicas del suelo

Durante la etapa de diseño de los electrodos de puesta a tierra, se deben medir las principales propiedades físicas del suelo en el sitio del electrodo. Estas mediciones deben realizarse durante las diferentes estaciones del año para determinar los parámetros eléctricos, térmicos y físicos necesarios para modelar el sitio y evaluar el impacto de los electrodos en el medio ambiente.

Las principales propiedades del suelo están sujetas a la variabilidad estacional, así como a la variabilidad con la profundidad y la ubicación en el sitio. Estos factores incluyen:

- Resistividad del suelo
- Capacidad térmica del suelo
- Conductividad térmica del suelo
- Temperatura natural más alta del suelo
- Tipo de suelo o material de roca
- Contenido de humedad
- Profundidad al nivel freático
- Temperatura a la profundidad del electrodo
- Susceptibilidad a electro-ósmosis
- Propiedades químicas

5.2 Consideraciones de diseño

Los electrodos de tierra generalmente se ubican relativamente cerca de las estaciones convertidoras y deben estar enterrados cerca de la superficie en forma horizontal o colocados en una configuración vertical de pozo profundo para garantizar el contacto con suelos de baja resistividad.

Además de las consideraciones generales de diseño y de los criterios de diseño descritos en la Sección 5.1.1, durante el diseño de un electrodo de tierra se deben tener en cuenta varios factores específicos, como el calentamiento del suelo, los altos potenciales y la electro-ósmosis.

El electrodo de tierra normalmente no está dimensionado para operar todo el tiempo en un esquema de retorno por tierra [13] y la forma del electrodo o su profundidad no afecta la intensidad del campo eléctrico en distancia mayores que 2 km a partir del electrodo [6].

Si los electrodos se colocan a corta distancia (en forma común o múltiple) y trabajan siempre con la misma polaridad, se debe evitar su operación en forma continua cuando el modo sea



monopolar con retorno por tierra [6].

5.2.1 Estabilidad térmica y rango de corriente

El aumento de la temperatura es una preocupación constante, principalmente para los electrodos de tierra, ya sea de configuración horizontal o vertical de pozos poco profundos. Los electrodos de costa y mar tendrían (o podrían diseñarse para tener) un intercambio de agua suficiente, para asegurar que cualquier calor generado en los elementos del electrodo se eliminaría sin un aumento excesivo de temperatura cerca de los elementos.

El rango de corriente que es de principal interés para el diseño térmico del electrodo de tierra es el rango de corriente en forma continua. Generalmente, la duración de la corriente de sobrecarga temporal y la corriente de sobrecarga transitoria con tiempos de segundos a horas son demasiado cortas para tener un impacto notable en el rango térmico del electrodo, que típicamente tendría una constante de tiempo del orden de cientos de días. La estabilidad térmica del sistema de electrodos necesita considerar la duración del servicio a corriente máxima continua para asegurar una vida estable a largo plazo de los sistemas.

5.2.2 Contenido de humedad del suelo y electro-ósmosis

El funcionamiento de un electrodo en modo anódico puede reducir el contenido local de humedad del suelo y, en caso de funcionamiento a alta corriente durante períodos prolongados con condiciones de suelo seco, puede provocar un secado acelerado y un escape térmico con el potencial de causar daño permanente al electrodo.

La disminución en el contenido de humedad del suelo se debe principalmente a los efectos de la electro-ósmosis y al aumento de la evaporación debido al aumento de la temperatura. Si la humedad del suelo baja demasiado y se necesita una operación monopolar continua del sistema, puede ser necesario proporcionar un suministro externo de agua para irrigar el sitio del electrodo.

Para minimizar la cantidad de agua requerida, el agua idealmente se aplicará inmediatamente adyacente al electrodo utilizando tuberías de riego enterradas o, si no se han proporcionado, se debe introducir agua en los pozos de filtración que permitan que el agua penetre rápidamente a la profundidad de la cama de coque.

Según una encuesta, muchos electrodos existentes tienen un contenido de humedad que oscila entre el 2,1% y el 37,7% del peso seco, y para algunos electrodos está indicado "saturado". Las estaciones de electrodos Chapki y Dankaur en la India, tienen arreglos para agregar agua a los electrodos en caso de suelo muy seco [13].



En la literatura se reportan dos casos típicos instalados: Para un electrodo poco profundo, su diseño consideró valores de 80 horas/año de operación con una corriente de 1800 A y una densidad de corriente de 0.5 A/m^2 ; para electrodos profundos, su diseño consideró una operación continua de 30 días con 1500 A, y una densidad de corriente de hasta 2 A/m^2 .

Los electrodos de tierra de grandes extensiones y enterrados cerca de la superficie, deben colocarse preferentemente en terreno plano, idealmente con una profundidad aproximadamente igual al nivel del agua subterránea. Si es posible, la configuración del electrodo debe seleccionarse y ubicarse de tal forma que se utilice la precipitación natural para aumentar el contenido de humedad del suelo alrededor del electrodo. En los electrodos costeros daneses, que son similares a los electrodos terrestres en su construcción, se utilizan alrededor de $5\text{-}8 \text{ A/m}^2$. Los niveles adecuados de humedad están garantizados por la ubicación cerca del mar y la profundidad del electrodo por debajo del nivel del agua del mar.

5.2.3 Consideraciones de operación y mantenimiento

Para la operación de un enlace en HVDC bipolar, el electrodo normalmente se opera en forma constante, llevando las corrientes producto del desbalance entre los dos polos. Durante una operación de emergencia o mantenimiento, cuando solo se encuentra en servicio un polo, el electrodo podría operar a su máxima corriente diseñada durante un período corto. Para configuraciones monopolares en HVDC, el electrodo puede operar continuamente entre la corriente nominal mínima y máxima. Las estadísticas históricas de las estaciones de electrodos existentes basadas en la encuesta realizada por CIGRE no proporcionan información detallada sobre la operación del electrodo. La mayoría de las respuestas dadas concluyen que los electrodos de HVDC suelen ser muy confiables cuando se considera el sistema total de HVDC.

Se han reportado algunas fallas en sub-electrodos individuales. Estas fallas se han producido principalmente en los cables que se ramifican a cada sub-electrodo. Los cables pueden dañarse, por ejemplo, cuando se cortan con piedras afiladas o en los bordes del hormigón. Las fallas también pueden ocurrir debido a la corrosión si hay una falla de aislamiento o fugas de agua en una junta en el alimentador o en los cables de distribución. El electrodo no se desconectaría, porque en general el electrodo se diseñaría de forma conservadora para permitir un 20% a 30% de interrupción de los conductores o sub-electrodos del alimentador y sin disminuir la capacidad total de transporte de corriente. En general, la estación del electrodo debe inspeccionarse regularmente, y también después de cualquier período de operación prolongada en modo monopolar para garantizar la integridad [13].



5.2.3.1 La inspección debe cubrir lo siguiente:

En general, la estación del electrodo debe inspeccionarse regularmente, y también después de cualquier período de operación prolongada en modo monopolar para garantizar la integridad.

- a) El relleno sobre los lechos de coque y las zanjas de cables debe inspeccionarse para asegurar que no haya habido asentamiento excesivo y que la nivelación de las depresiones sobre las zanjas incline hacia los pozos de filtración si está instalada. Cualquier suelo que se haya perdido por sedimentación o erosión local debido al flujo excesivo de agua debe ser restaurado.
- b) Retirar toda la materia extraña que pueda impedir el flujo de agua desde la parte superior de los pozos de filtración. Si ha habido asentamiento o erosión alrededor de los bordes de hormigón, se deben restaurar a la pendiente original y se debe restaurar el relleno.
- c) Inspeccionar la condición de los seccionadores, cables, abrazaderas, aisladores, estructuras, bases de la estructura, cimientos de estructuras, tubos/pozos de medición de humedad y temperatura, etc. y reparar cualquier elemento dañado según sea necesario.
- d) Programar un período de operación monopolar, medir las corrientes en cada subsección del electrodo y compararlo con el intercambio actual obtenido durante las pruebas iniciales de puesta en marcha. Un desbalance de corriente excesivo en comparación con las mediciones originales puede ser un signo de daño oculto, como una falla en la unión del cable.

5.2.3.2 Cálculos sencillos

La elevación de potencial de tierra (GPR), el gradiente de potencial y las tensiones máximas de paso y de contacto, y la resistencia de CD a tierra remota se pueden estimar matemáticamente para varios tipos y formas de electrodos para la resistividad del suelo de distribución uniforme, de 2 ó 3 capas.

De acuerdo con la práctica de la industria, la densidad de corriente se calcula como la corriente aplicada dividida por el área de superficie del coque al límite del suelo. Normalmente, la corriente de sobrecarga de corto tiempo y con una interrupción específica de los sub-electrodos (si corresponde) se debe utilizar para el cálculo de la densidad de corriente.



5.2.3.3 Verificación del diseño

Las pruebas deben realizarse después de la instalación y durante la puesta en servicio de los electrodos para evaluar el rendimiento del electrodo y para confirmar que el diseño del electrodo cumple con los criterios y requisitos especificados.

Las mediciones de verificación del diseño del electrodo deben incluir lo siguiente:

1. Resistencia del electrodo a tierra remota (cualquier tipo de electrodo).
2. Elevación de potencial del suelo GPR (cualquier tipo de electrodo).
3. Distribución de corriente en sub-electrodos (cualquier tipo de electrodo).
4. Tensiones de paso y contacto (electrodos de costa y de tierra).
5. Gradientes de potencial en agua (electrodos de costa y marinos).
6. Temperatura y humedad del suelo (electrodos de tierra únicamente).
- 7.

Los resultados de las mediciones se deben comparar con los valores de diseño calculados. En general, no se espera que los resultados de las mediciones reales puedan coincidir exactamente con el diseño. Sin embargo, deben ser similares y mostrar las mismas tendencias que los valores de diseño. Si las mediciones se desvían significativamente del diseño, especialmente con respecto a la seguridad, se requerirá la aplicación de los esquemas de mitigación antes de que el electrodo entre en operación.

5.3 Procedimiento de diseño

El diseño del EPT implica la consideración de los siguientes factores, los cuales deben estar dentro de los límites aceptables o seguir las consideraciones descritas en los capítulos 3, 4 y 5. A continuación se enumeran los pasos a seguir para realizar el diseño del EPT con un cumpliendo con cada uno de los tópicos, indicados en los capítulos mencionados, ver tabla 5.1 que indica el procedimiento de diseño:

Tabla 5.1 Procedimiento de diseño

No. Paso	Actividad	Descripción	Capitulo. de Ref.
1.	Definir, rangos de corriente, selección del sitio y requerimientos de operación	<ul style="list-style-type: none"> Propiedades físicas y químicas del suelo Corriente nominal continua (A) Sobrecarga de Corriente nominal al 110% (A) Sobrecarga de Corriente nominal corta, 30 minutos 120% (A) Sobrecarga de Corriente nominal corta, 10 segundos 130% (A) 	4.3.1.1 4.3.2 5.1.6
		<ul style="list-style-type: none"> Selección del sitio, (ubicación de las zonas tentativas, para evaluar las características técnico-económicas y ambientales) Zonas ambientales sensibles Infraestructura eléctrica Cercanía a las estaciones convertidoras Factores excluyentes (asentamiento humano) Identificar las limitaciones en la distancia máxima al sitio del electrodo 	3.3 3.6 3.7
2.	Definir criterios de seguridad (gradiente de potencial)	<ul style="list-style-type: none"> Tensión de paso, contacto y contacto metal-metal Tensión transferida o potencial transferido Ciclo de vida del proyecto Confiabilidad Polaridad 	4.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.3
3.	Medir resistividad del suelo y dimensionamiento	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de resistividad (<100 Ωm como limite maximo) Medición de resistividad Profundidad de enterramiento del electrodo Sección del relleno 	3.6 3.7 4.1 4.2 5.2



		<ul style="list-style-type: none"> • Radio en el caso de electrodos circulares • Número de pozos en el caso de electrodos profundos • Resistencia del electrodo • Densidad de corriente • Temperatura • Tiempo de operacion 	
4.	Realizar diseño propuesto y evaluar los criterios de seguridad definidos	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar los cálculos y especificación de diseño del electrodo definido. 	5.1.3
5.	<p>Verificar cumplimiento de criterios de seguridad</p> <p>Sí → Continúe en paso 5 No → Regrese en paso 3</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar las condiciones operativas del electrodo de acuerdo a lo definido. Aplicando los pasos 1 a 4. 	5.1.3.1
6.	Verificar las limitaciones físicas del sitio para la profundidad de instalación	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar los estudios geológicos y geofísicos obtenidos de la zona seleccionada para ratificar que no exista afectación natural o material en alguna profundidad el entorno de instalación. 	3.7
7.	<p>Cumplir con las restricciones físicas</p> <p>Sí → Continúe en paso 10 No → Regrese en paso 7</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar las posibles restricciones y soluciones a diferentes profundidades (mantos acuíferos, minas de materiales preciosos, etc.), definidas en el paso 5. 	3.7
8.	Ajustar el diseño	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar los Ajustes de acuerdo a las necesidades observadas 	
9.	<p>Diseño construible</p> <p>Sí → Continúe en paso 6 No → Regrese al inicio</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Una vez realizados los cambios y/o ajustes, el diseño pasa al siguiente paso. 	
10.	Revisar selección de sitio	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar revisión general de la información del sitio 	3.3
11.	Verificar el aumento de temperatura y la clasificación térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Verificara la temperatura del electrodo • Verificar características térmicas 	3.5.3 4.1.2 5.1.6.2 5.2.1
12.	Cumplir con los requisitos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste la temperatura del electrodo • Ajuste características térmicas 	4.2.5



	<p>Sí ➔ Continúe en paso 14 No ➔ Regrese en paso 12</p>		
13.	Ajuste de diseño	<ul style="list-style-type: none"> Ajustar el diseño de acuerdo al paso 11 	
14.	<p>Económicamente Factible Sí ➔ Continúe en paso 11 No ➔ Regrese en paso 9</p>	<ul style="list-style-type: none"> Concluidos los ajustes, define el siguiente pasos (11, 9) 	
15.	Verificar la influencia medioambiental	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura del suelo (<100 °C) Humedad de suelo Medición de resistencia del electrodo ($\leq 0.3 \Omega m$) Medición de los sub-electrodos Medición de distribución de corriente Medición de potenciales de paso y contacto 	6.1
16.	<p>Cumplir requerimientos medioambientales Sí ➔ Continúe en paso 16 No ➔ Regrese en paso 9</p>	<ul style="list-style-type: none"> Impacto de flora y fauna Aspectos químicos 	6.3
17.	Identificar las zonas de influencia y las que podrían ser afectadas	<ul style="list-style-type: none"> Medición de los parámetros del EPT Impacto en infraestructura Impacto en el medio ambiente 	6.1 6.2 6.3
18.	<p>Instalaciones afectadas fuera del rango permitido Sí ➔ Continúe en paso 18 No ➔ Regrese en paso 9</p>	<ul style="list-style-type: none"> Impacto en infraestructuras 	6.2
19.	Identificar y diseñar una mitigación adecuada para las instalaciones afectadas	<ul style="list-style-type: none"> Medidas de mitigación necesarias, de acuerdo a lo obtenido del 15 al 17. 	6.4
20.	<p>Práctico y económico Sí ➔ Continúe en paso 20 No ➔ Regrese en paso 9</p>	<ul style="list-style-type: none"> Una vez atendidas las medidas de mitigación del proyecto, estará en condiciones de operación. 	
21.	Diseño concluido		



5.4 Ejemplo de diseño de un electrodo de puesta a tierra

Esta sección ilustra un ejemplo de un diseño de electrodo con una configuración de anillo superficial, simple y doble, aplicando el procedimiento de la sección 5.3, ver Figuras 5.7 y 5.8.

5.4.1 Condiciones y criterios de diseño

Las condiciones de diseño especificadas, la corriente nominal de los electrodos y los criterios de diseño se enumeran en la tabla 5.2.

5.4.2 Parámetros de diseño

La tabla 5.2 muestra los parámetros de diseño para un arreglo de un anillo y anillo doble.

5.4.3 Consideraciones de seguridad (potenciales)

Tabla 5.2 Condiciones de diseño, corrientes nominales y criterios de diseño

CONDICIONES DE DISEÑO	
Temperatura ambiente del aire	
Temperatura máxima promedio	35°C
Temperatura anual promedio	30°C
Condiciones del suelo	
Resistividad del suelo (uniforme equivalente ρ_s)	70 Ω m
Conductividad térmica del suelo	1°C m/W
Corriente nominal de electrodo	
Corriente nominal continua (A)	3000
Sobrecarga de corriente nominal (110%, A)	3300
Sobrecarga nominal corta, 30 minutos (120%, A)	3600
Sobrecarga nominal corta, 10 segundos (130%, A)	3900
Corriente para calcular la densidad de corriente en la interface de coque - suelo, con 30% de sub-electrodos fuera de servicio (A)	3600
CRITERIO DE DISEÑO	
Voltaje de paso máximo permitido requerido sugerido por el diseñador, (V / m), que se usa como criterio de diseño.	$5+0.03*\rho_s = 7.1$ V
Voltaje de contacto para estructuras de metal conectadas a tierra, en contacto al público, (V)	$7.42 + 0.008*\rho_s = 7.98$ V
Vida útil del electrodo	Menor a: 60 millones de Amperes Hora, para 30 años de operación normal
Modo de operación	Puede ser cátodo o ánodo
Máxima resistencia de puesta a tierra del electrodo, (Ω)	≤ 0.3 Ω
Densidad de corriente promedio en el límite del suelo – coque, con el 25% de los sub-electrodos fuera de servicio (A/m ²)	<1.0
Tipo de electrodo	Anillo circular concéntrico sencillo o doble con cable 500 AWG (ver Figura 5.7 y Figura 5.8)
Numero de sub-electrodos	Por lo menos 10
Temperatura máxima en cualquier punto del electrodo durante la operación, (° C).	< Temperatura de ebullición del agua
Operación continua a 3000 A	Vida útil del electrodo

Tabla 5.3 Parámetros de diseño

	Anillo sencillo	Anillo doble
Diámetro (m)	800	Anillo interior =420. Anillo exterior=560
Profundidad (m)	3	3
Tamaño de la sección transversal	1.25m x 1.25m	1 m x 1 m

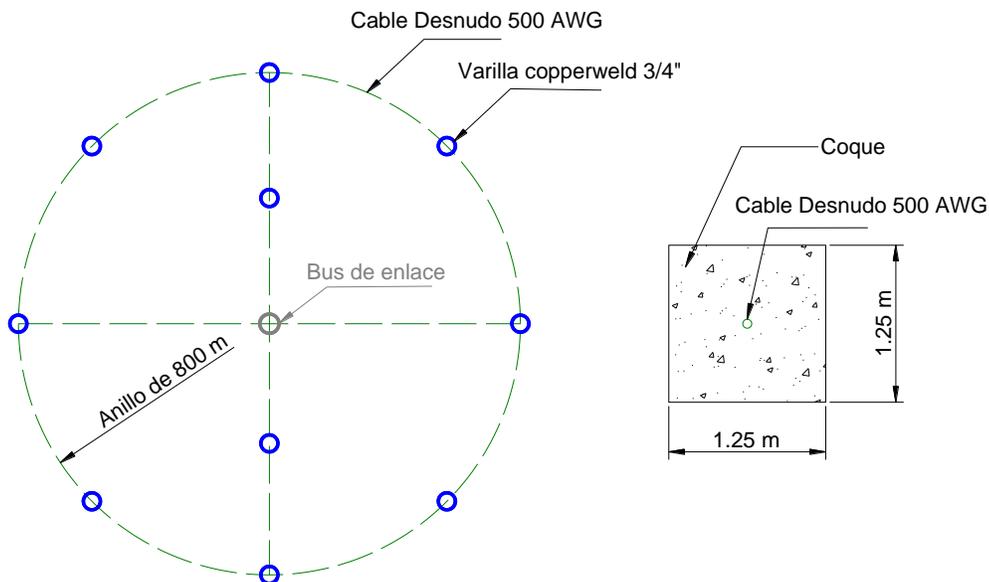


Figura 5.7 anillo sencillo y sección transversal de coque.

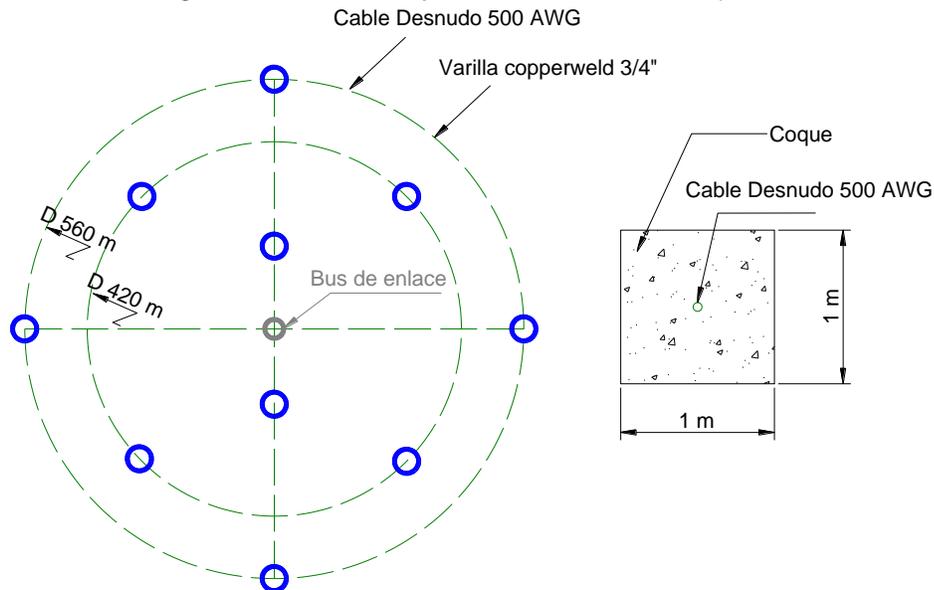


Figura 5.8 Doble anillo y sección transversal de coque.

5.4.4 Estabilidad térmica y corrientes.

En ninguna circunstancia la máxima temperatura en cualquier punto del electrodo de tierra debe ser mayor que el punto de ebullición correspondiente a la latitud del sitio de ubicación del electrodo. Por ejemplo, a nivel del mar, la temperatura máxima permitida es de 100 °C [6].



La Tabla 5.4 presenta el aumento máximo de la temperatura del electrodo, la constante de tiempo térmica y los datos de suelo asociados que se utilizaron en el cálculo.

La temperatura del suelo pre-existente a la profundidad del lecho de coque se consideró en forma conservadora con un valor de 30 °C. El aumento de temperatura máximo calculado es de aproximadamente 325 °C. Con la aplicación del factor de 5 según CIGRE 14.21 TF2 [29], se espera que el aumento real de la temperatura sea de 65°C y la temperatura final del electrodo sea de 65°C + 30°C = 95°C, que cumple los requisitos. Dadas las constantes de tiempo de más de 1 año y el aumento de temperatura esperado de aproximadamente 65°C, debería ser posible para este electrodo trabajar con sobrecarga continua en modo monopolar a 3300 A por más de 2 años.

5.4.5 Corriente entre sub-electrodos

El electrodo en anillo se divide en 10 sub-electrodos iguales para facilitar la inspección, la prueba y, si es necesario, el mantenimiento. Si la resistividad del suelo fuera completamente uniforme, la corriente se distribuiría por igual en los diez sub-electrodos cuando no hay interrupciones en las secciones de los mismos. Sin embargo, en el caso de una interrupción de algunos sub-electrodos, fluiría más corriente en los sub-electrodos adyacentes a los sub-electrodos no energizados, como se observa en la Tabla 5.5 que fue calculada con una corriente nominal de 4500 A y 10 segundos [30].

También si la resistividad no está distribuida uniformemente, que es el caso normal, la corriente en estos sub-electrodos variará incluso en condiciones sin interrupción. Por lo tanto, la corriente nominal de los cables debe tomar en cuenta la distribución de corriente desigual durante la interrupción de las secciones de los electrodos y también para otras condiciones del suelo en lugar de una resistividad uniforme.

Tabla 5.4 Aumento máximo de temperatura del electrodo

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor		
			Diseño de anillo Simple	Diseño de doble anillo	
				Anillo interno	Anillo externo
Resistividad del suelo	ρ	Ωm	70		
Conductividad térmica del suelo	λ	$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	1.0		
Constante térmica en tiempo	T	años	2.77		
Electrodo de corriente (Corriente de carga nominal)	I_d	A	3300	1287	2013
Cálculo de resistencia de puesta a tierra del electrodo	R_e	Ω	0.07	0.12	0.09
Aumento de voltaje del electrodo con respecto el electrodo de corriente. (basada en una resistividad uniforme del suelo)	V_e	Volts	213	154	182
Aumento de la temperatura máxima prevista del electrodo	θ_e	$^\circ\text{C}$	325/5=65	169/5=34	237/5=48

Tabla 5.5 División de corrientes entre sub-electrodos

Número de caso	Flujo de corriente en cada Sub-electrodo (A)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Max	Pro	
Resistividad uniforme del suelo	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Resistividad uniforme del suelo a 30 % del electrodo	Sin conexión	662	611	682	Sin conexión	Sin conexión	680	604	601	659	682	643	

5.4.6 Densidad de corriente

La densidad de corriente promedio se calcula como la corriente aplicada dividida por el área del coque al límite del suelo. La corriente nominal de sobrecarga de 30 minutos y la interrupción del 30% de los sub-electrodos se utiliza para el cálculo de la densidad de corriente. La densidad de corriente se determina por separado para los anillos interior y exterior para el diseño de doble anillo y los resultados se indican en la Tabla 5.5. La densidad de corriente calculada cumple con 0.5-1.0 A/m² especificado.

5.4.7 Resistencia de puesta a tierra del electrodo

La resistencia de puesta a tierra del electrodo debe ser inferior a 0,3 Ω en todas las condiciones. La Tabla 5.7 indica la resistencia de puesta a tierra estimada del electrodo para el diseño del anillo simple y del anillo doble en condiciones normales y transitorias de operación. En cualquier caso, la resistencia cumple con el requisito.

Tabla 5.6 Densidad de corriente calculada en la interface coque-suelo

Parámetros	Diseño de anillo sencillo	Diseño de doble Anillo	
		Anillo interior	Anillo exterior
Tamaño de la sección transversal de Coque (m x m)	1.25 x 1.25	1.0 x 1.0	1.0 x 1.0
Diámetro del anillo (m)	800	420	560
Superficie de contacto coque-suelo, m ²	12556	5278	7038
Volumen de coque usado (m ³)	3927	1319.5	1759.2
Corriente por cada electrodo (%)	100	39	61
Corriente máxima en cada electrodo (A)	3600	1404	2196
Densidad de corriente en la interface suelo – coque, (A / m ²)	0.29	0.27	0.38
Superficie de interface suelo – coque con 30% (m ²)	7037	3694	4926
Densidad de corriente promedio en la interface coque - Suelo con 30% (A/ m ²)	0.41	0.38	0.45

Tabla 5.7 Resistencia de puesta a tierra del electrodo

Casos de diseño	Resistencia desde el punto de inyección a la tierra real (Ω)		
	Anillo simple	Doble anillo	Criterio
Sin interrupción	0.074	0.078	≤ 0.3
Interrupción del 30% al electrodo	0.092	.092	

Nota 1: Incluir la resistencia del cable de medición



5.5 Costo estimado de construcción del EPT

Se realizó un sondeo online de los principales proveedores de materiales para la fabricación de intensificadores en base coque ([CARBOGRAFT](#)), además de los componentes principales del EPT como son: conductor interno, cable de bus y excavaciones para instalación, ([VIKON](#), [GENERALCABLE](#), [MEGAMEX](#) y Licitaciones de la CFE, en microsito), en base a los costos obtenidos, se muestra la Tabla 5.8 con los montos de referencia para la construcción de un EPT de anillo simple de 800 metros de diámetro, considerando los resultados del ejemplo de la sección 5.4. ver Figura 5.7.

Tabla 5.8 Costo estimado de construcción del EPT

EPT de anillo Simple, con un diámetro de 800 m					
Obra Electromecánica					
No.	Concepto y descripción	Unidad	Cantidad	Costo por unidad (\$)	Costo por concepto (\$)
1	Coque "Intensificador de puesta a tierra"	Tonelada	3927	980	\$3,848,460.00
2	Conductor interno, horizontal, cable de cobre desnudo 500 KCM	Metro	800	200	\$160,000.00
3	Conductor interno, vertical, Varilla Copperweld 3/4" y herrajes	Pieza	10	600	\$6,000.00
4	Registros	Pieza	10	15000	\$150,000.00
5	Mano de obra para instalación	Metro	830	8000	\$6,640,000.00
6	Accesorios de conexión (exotérmicos y mecánicos)	Lote	1	100000	\$100,000.00
7	Bus de conexión (enlace) 2 hilos (calibre 1272 MCM)	Metro	10000	2800	\$28,000,000.00
				sub total	\$37,364,460.00
Obra Civil					
8	Excavación y construcción de Banco de ductos subterráneo para Enlace	Metro	10000	10000	\$110,000,000.00
9	Excavación de anillo de 800 m	Metro	1000	3000	\$ 3,000,000.00
				sub total	\$113,000,000.00
Costo Total (M.N.)					\$150,364,460.00

Notas:

1. El sondeo no considera el costo del terreno.
2. No se consideran la estación de control del enlace.



Capítulo 6. PUESTA EN SERVICIO E IMPACTO DE OPERACIÓN

Después de la instalación del electrodo, se deben realizar pruebas de puesta en servicio para verificar que el electrodo ha sido construido de acuerdo con el diseño, y para evaluar el rendimiento del electrodo y garantizar que cumpla con los criterios y requisitos especificados. La estación de electrodo también debe inspeccionarse regularmente y después de cualquier operación continua en modo monopolar para garantizar su integridad.

6.1 Medición de parámetros del electrodo de puesta a tierra

Se recomienda realizar las siguientes mediciones durante la puesta en servicio del EPT para garantizar su correcta operación de acuerdo CIGRE [31] y [13].

1. Resistencia de puesta a tierra.
2. Tensiones de paso y de contacto.
3. Distribución de corriente entre sub-electrodos.
4. Verificación de las protecciones instaladas en la línea de enlace y del sistema de monitoreo y adquisición de datos de electrodos (temperatura, humedad, etc.).
5. Mediciones de interferencia con respecto a las instalaciones externas, por ejemplo, corriente en neutro de transformadores, tuberías con sistema de protección catódica.

6.1.1 Temperatura del suelo

La temperatura del suelo se debe medir antes y después de que el electrodo se energice. La temperatura del suelo debe medirse a diferentes profundidades con respecto a la ubicación del electrodo. La Figura 6.1 muestra un ejemplo de una medición a tres profundidades diferentes, 0.5 m, 1.5 m y 2.5 m considerando que el electrodo está ubicado a 2.5 m.

También se recomienda medir la temperatura del suelo durante un largo período igual al menos una constante de tiempo térmica o, si este tiempo es difícil de alcanzar, durante al menos una semana para que se pueda documentar un aumento de temperatura y comparar la constante térmica temporal del diseño. Las mediciones pueden ser continuas durante todo el período o se pueden tomar varias mediciones a intervalos hasta que se pueda establecer una tendencia.

En caso de que se realicen varias mediciones, éstas deberán ejecutarse durante el día con muestras de temperatura y se registrarán cada una o dos horas. La temperatura máxima y

promedio para cada período de medición debe documentarse y registrarse.

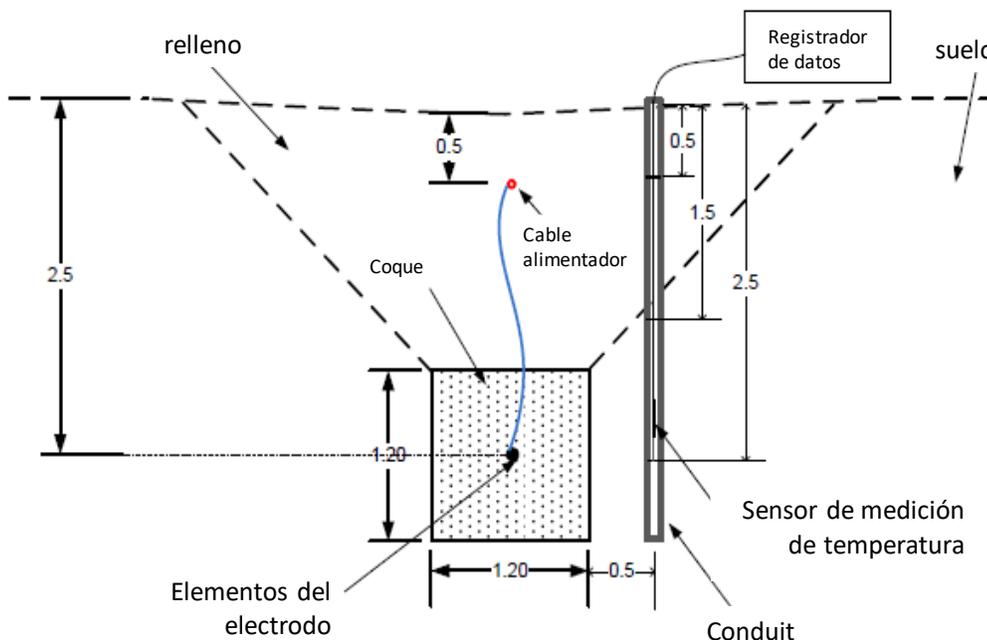


Figura 6.1 Diagrama de medición de temperatura del suelo [31].

Las mediciones deben tomarse de todos los lugares de medición de temperatura que se hayan proporcionado en las diferentes ubicaciones en los sitios de electrodos.

6.1.2 Humedad del suelo

Se sugiere realizar mediciones de humedad del suelo que incluye la medición de la profundidad del nivel del agua y la humedad gravimétrica del suelo como se define a continuación durante la puesta en marcha [13].

6.1.2.1 Nivel de agua

Debe establecerse la profundidad de la capa superior del suelo saturado, en al menos un punto en el sitio, Humedad Gravimétrica: (el% de agua presente en una muestra en peso)

$$\theta_{\text{grav(dr)}} = \frac{\text{massH}_2\text{O}}{\text{mass}_{\text{dr}}} * 100 \quad (6.1)$$

Donde:

- $\theta_{\text{grav(dr)}}$ Gravedad gravimétrica en una masa seca
- massH_2O Masa de agua presente en la muestra de suelo
- mass_{dr} Masa de la muestra de suelo seco

$$\theta_{\text{grav(wet)}} = \frac{\text{massH}_2\text{O}}{\text{mass}_{\text{wet}}} * 100 \quad (6.2)$$

Donde:

- $\theta_{\text{grav(wet)}}$ Gravedad gravimétrica en una masa húmeda

$mass_{H_2O}$ Masa de agua presente en la muestra de suelo

$mass_{wet}$ Masa de la muestra de suelo húmedo

La medición gravimétrica directa de la humedad del suelo libre requiere quitar, secar y ponderar una muestra y realizar un trabajo de laboratorio que no es fácil de incorporar en ningún programa de medición.

Se sugiere usar sensores portátiles de humedad del suelo para medir el contenido volumétrico de agua, tomando las precauciones que procedan, ya que la elevación de potencial de tierra GRP es más alto que el electrodo.

La humedad del suelo se debe medir a la misma profundidad y ubicación que la aplicada en medición de la temperatura del suelo, antes y después de que el electrodo se energice.

La disminución de la humedad puede tomar semanas o meses cuando el electrodo está en funcionamiento de manera continua. La medición debe hacerse a intervalos regulares, según la tendencia del contenido de humedad. La hoja de registro de datos debe registrar la fecha/hora de la medición, la humedad medida del suelo y la carga del electrodo (corriente) y la ubicación de medición.

6.1.3 Medición de resistencia

La resistencia de puesta a tierra se puede medir sin que el electrodo esté en servicio, de acuerdo con la IEEE 81 [31], por el método de caída de potencial:

Aplique una corriente de 100 A como máximo entre el electrodo A (electrodo bajo prueba) como se muestra en la Figura 6.2 y un electrodo auxiliar de corriente B. El electrodo B debe colocarse alejado del electrodo bajo prueba.

Mida la corriente entre A y B.

Mida el potencial entre el electrodo A bajo prueba y el electrodo auxiliar de potencial C.

Mueva el electrodo de potencial C lejos del electrodo de tierra en pasos de 50 m como mínimo.

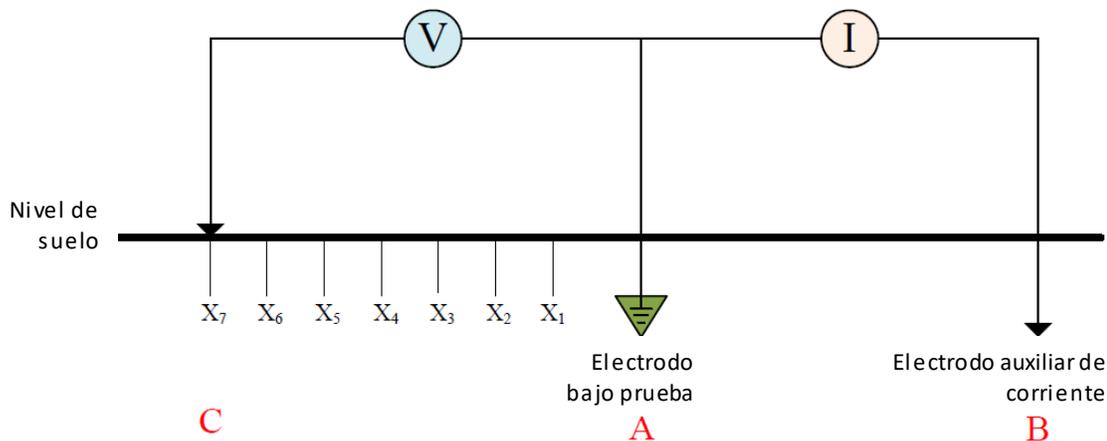


Figura 6.2 medición de la resistencia de puesta a tierra [31]

Se obtiene un valor de impedancia en cada paso. Esta impedancia se grafica en función de la distancia, y el valor en ohms (Ω) en la zona asintótica (sin cambios) será el valor que define la impedancia del electrodo de puesta tierra. Ver la Figura 6.3.

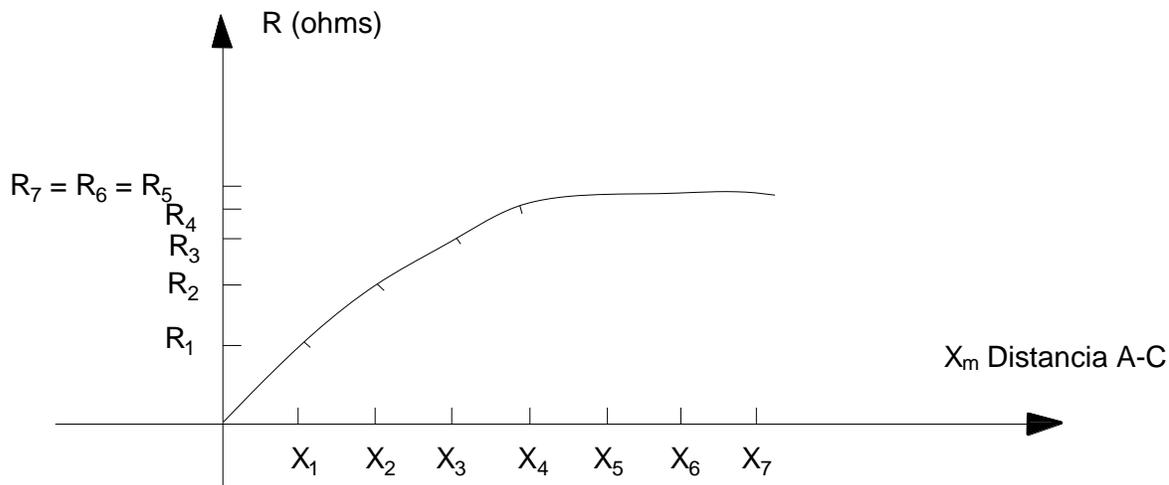


Figura 6.3 Impedancia vs distancia

Para obtener un resultado confiable (sin alguna influencia de los electrodos auxiliares) entre los potenciales de los electrodos actuales, el ángulo entre la línea de aplicación de la corriente y el conductor de potencial debe ser de 90-180 grados como se muestra en Figura 6.4.

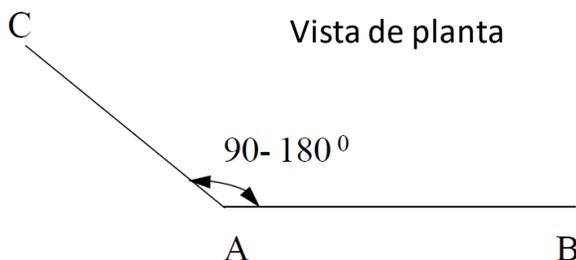


Figura 6.4 Ángulo entre los conductores de corriente (B) y potencial (C)

Para evitar los efectos de polarización del suelo y los potenciales espontáneos en el suelo, la corriente aplicada debe invertir su polaridad durante la medición (corriente directa alternada), en intervalos de tiempo como se muestra en la Figura 6.5.

Paso 1) Aplique los 100 A y obtenga la lectura del potencial U_1 .

Paso 2) Desconecte el equipo y mida el potencial U_2 en los siguientes 10 segundos o en el tiempo en que la lectura se estabilice (sin cambios).

Paso 3) Calcule la diferencia de potencial $U_1 - U_2$.

Paso 4) Repita la medición cambiando la polaridad.

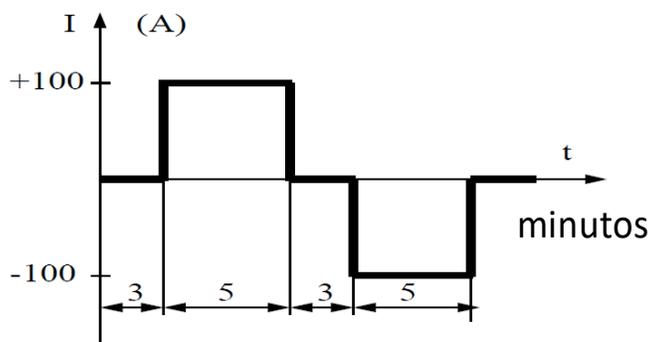


Figura 6.5 Polaridad invertida para reducir efectos de polarización [31]

6.1.4 Resistencia de sub-electrodos

La resistencia del sub-electrodo se puede medir de manera similar al electrodo, excepto que la fuente de corriente está conectada a solo uno de los electrodos y al electrodo auxiliar de corriente. La corriente debe reducirse a 20 A aproximadamente. Las mediciones deben realizarse sin que el electrodo esté en servicio.

6.1.5 Mediciones de distribución de corriente

6.1.5.1 Arreglos temporales

Para completar el circuito de prueba, es necesario disponer un electrodo remoto y un suministro de corriente de CD adecuado para el arreglo.

El electrodo auxiliar remoto debe colocarse al menos 6,5 veces la dimensión (diámetro o longitud) del electrodo HVDC.

La línea de enlace o la línea de transmisión puede utilizarse como conductor para los electrodos auxiliares de corriente y potencial.

Al final de la línea o a la distancia de 6.5 veces la dimensión del electrodo, la línea debe estar conectada a tierra, a una torre o a un electrodo.

6.1.5.2 Distribución de corriente

Debe medirse la distribución de corriente en los sub-electrodos para que el desbalance esté dentro de los límites aceptables. La medición debe realizarse tanto para baja y alta corriente.

6.1.5.3 Baja corriente

Para la primera medición, debe aplicarse una corriente de 100 A entre el electrodo bajo prueba y la tierra remota. Si una malla de puesta a tierra se usa como tierra remota, la corriente máxima debe ser de 20 A [31]



Las corrientes medidas deben incluir:

1. La corriente total en el electrodo.
2. La corriente en cada sub-electrodo.

6.1.5.3.1 Alta corriente

La medición debe realizarse con una corriente mayor desde el convertidor y debe medirse la corriente a través de cada sub-electrodo.

En general, si todos los sub-electrodos son del mismo tamaño, están en suelo similar y están dispuestos en una forma simétrica, no deben exceder el 20% de desbalance (I_{max}/I_{avg} o I_{min}/I_{avg}). En caso contrario, pueden existir grandes variaciones y los resultados desbalanceados pueden considerarse normales.

El desbalance de corriente puede variar con el tiempo conforme los niveles de humedad del suelo que cambia debido a las variaciones estacionales.

La última prueba para determinar si un sub-electrodo está transportando mucha corriente sería monitorearla durante un largo período en condiciones de operación de alta corriente.

Si se presentan las siguientes condiciones, el nivel de corriente puede llegar a ser tan alto que deberá agregarse una resistencia externa:

- (a) Se están violando los criterios de seguridad cerca del sub-electrodo.
- (b) La temperatura aumenta más rápidamente en algunos electrodos secundarios.
- (c) Los niveles de humedad cerca del sub-electrodo están disminuyendo de manera constante con la electro-osmosis.

6.1.6 Mediciones de potencial y gradiente

El procedimiento de la prueba de medición debe llevarse a cabo para los potenciales de paso y paso de acuerdo a IEEE 81 "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems" [31].

6.1.6.1 Tension de paso

La tensión de paso debe medirse de la siguiente manera:

Aplique una corriente de 100 A máximo al electrodo bajo prueba y a un electrodo auxiliar remoto. El electrodo auxiliar remoto debe colocarse lejos del electrodo bajo prueba. Se debe utilizar una corriente conmutada como en la Figura 6.1. Sin embargo, el período de ciclo puede ser más corto.

Coloque dos electrodos de cobre o sulfato de cobre en la superficie de la tierra a un metro de distancia. También se pueden utilizar dos varillas enterradas a una profundidad del suelo de



200 mm. Las varillas deben estar en contacto con la tierra humedecida en el punto de colocación.

Mida el potencial entre los dos electrodos o varillas con y sin una resistencia de 1 k Ω en paralelo. La medición debe llevarse a cabo con intervalos de un metro desde el centro del área del electrodo enterrado en varias direcciones radiales.

La medición debe realizarse a una distancia del centro del área del electrodo de al menos la longitud resultante de la suma de la periferia del electrodo (r) más el doble de la profundidad enterrada (h) del electrodo ($r + 2h$). El gradiente de tensión máxima ocurrirá a una distancia de la periferia del electrodo igual a la profundidad dividida por $\sqrt{2}$ del sistema de electrodos.

6.1.6.2 Tensión de contacto

La medición de la tensión de contacto consiste en la tensión de contacto alrededor del electrodo sin la malla de puesta a tierra, y debe medirse de la siguiente manera:

Aplique una corriente máxima de 100 A entre el electrodo bajo prueba y un electrodo auxiliar de corriente ubicado lejos del electrodo de prueba (punto remoto). Mida la corriente.

Mida el potencial entre las placas de metal y el electrodo bajo prueba, con y sin la resistencia de 1 k Ω . La distancia horizontal entre el electrodo bajo prueba y las placas metálicas debe ser de 1 m. Las placas deben descansar sobre el suelo y con una fuerza mínima de 500 N. El electrodo bajo prueba simula el punto de contacto de la mano, y las placas simulan la ubicación de los pies sobre el suelo.

Las tensiones de contacto deben evaluarse en estructuras metálicas, cercas, torres, etc. cerca del electrodo, objetos de gran longitud, como tuberías y cables en contacto con el suelo a algunos kilómetros del electrodo.

6.2 Impacto en infraestructura

6.2.1 Sistemas de CA

El impacto de la corriente en tierra de CD sobre los sistemas de CA se ilustra en la Figura 6.6. Si los hilos de guarda de la línea son continuos de A a B, parte de la corriente que se acopla fluye en estos hilos y puede descargarse en otras torres más adelante en la línea donde el potencial de tierra es menor. Las torres intermedias más cercanas al ánodo recogen las fracciones de corriente más significativas, mientras que las torres más cercanas al cátodo descargan las fracciones correspondientes.

La situación es similar para la tubería o cable metálico continuo, donde la longitud total de la

línea se divide en una zona catódica (izquierda) y una zona anódica (derecha en el dibujo). El principal riesgo es la corrosión de los puntos anódicos donde la corriente llega a los elementos de la red de puesta a tierra de las torres. Esto puede ser muy problemático, especialmente en el caso de las torres con retenidas, pero puede mitigarse utilizando el enfoque del Prof. S. Rusck al limitar la densidad de corriente máxima a menos de $1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ y al instalar aisladores en el cable de conexión [13].

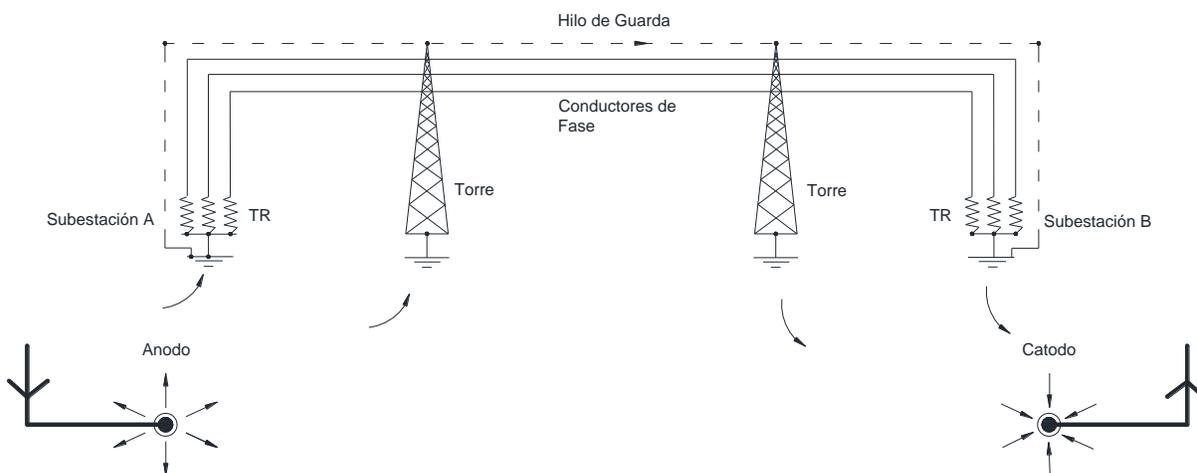


Figura 6.6 Sistema de CA expuesto al campo eléctrico generado por la CD en tierra [13].

Parte de la corriente que sale del ánodo entra parcialmente a la red de puesta a tierra de la subestación A y fluye a los neutros conectados a tierra del transformador y a lo largo de los conductores de fase hacia la subestación B, donde la corriente se descarga a través de la red de puesta a tierra y fluye hacia el cátodo. La componente de CD en la línea aérea es independiente de la corriente de fase de CA. Esta CD puede tener dos consecuencias: Saturación de los transformadores conectados a tierra si la CD es muy grande, y Corrosión de la red de puesta a tierra de la estación más cercana al cátodo.

La componente de CD a través de los devanados del transformador provoca una magnetización constante del núcleo. Esta corriente de magnetización se superpone a la corriente de magnetización de CA simétrica y causa un desplazamiento unidireccional en el flujo, que puede conducir a la saturación del núcleo. La forma de onda de la corriente de magnetización se distorsiona principalmente debido a la presencia de la corriente de la segunda armónica.

Esta vulnerabilidad de los transformadores a la corriente de magnetización de CD es diferente para los diferentes tipos de núcleo. Los transformadores pueden soportar cierto nivel de CD del neutro. Esto debe verificarse con los fabricantes de transformadores y se debe solicitar información sobre los niveles de resistencia cuando se adquieren los transformadores.



Los transformadores monofásicos con un retorno magnético similar al área de la pierna afectada se ven fuertemente afectados. Los transformadores trifásicos de cinco patas también reaccionan en cierto grado, porque el flujo de CD, que es unidireccional en las piernas trifásicas, encuentra un camino de baja reluctancia en las dos patas externas. Los transformadores trifásicos de tres patas soportarán un alto nivel de excitación de CD, porque el flujo de CD se desarrolla solo en bajos niveles debido a la alta resistencia magnética de los espacios de aire desde el yugo superior al yugo inferior.

Desafortunadamente, los transformadores convertidores suelen ser de tipo monofásico, debido a los altos costos de transporte, y para reducir el costo de las unidades de repuesto. Por ejemplo, la infraestructura de transporte en Europa Occidental normalmente permitirá el transporte de unidades de hasta 250-300 toneladas. Para una clasificación por polo de 600 MW o superior, se usan comúnmente transformadores monofásicos, mientras que dos transformadores trifásicos por polo son manejables para potencias hasta aproximadamente 500 MW. Los transformadores trifásicos de cinco patas tienen una menor altura que los de tres patas [13].

Similar a los medios de mitigación indicados para objetos metálicos enterrados sin aislamiento, un medio eficaz para evitar la excitación de corriente de tierra en CD de los transformadores es ubicar la estación del EPT lo más alejada posible desde cualquier subestación vulnerable, incluida la estación convertidora. Otra medida que puede considerarse es la instalación de condensadores de bloqueo o resistencias entre la conexión del neutro de los transformadores y la red de puesta a tierra de la subestación.

Los reactores con núcleos magnéticos, para fines de compensación, no están en riesgo de saturación de CD, porque los espacios en aire (entre-hierros) en el circuito magnético evitan que el reactor alcance un flujo constante significativo. Esta afirmación es válida ya sea que los reactores sean monofásicos o trifásicos, con núcleos de tres o cinco patas.

Al analizar la posibilidad de saturación, la configuración de la red de puesta a tierra suele ser mucho más complicada que la disposición simplificada que se indica en la Figura 6.1. Por lo tanto, deben considerarse las redes con detalle y sus valores de resistencia, como las redes en las diferentes estaciones, las interconexiones mutuas entre estaciones y la resistencia en transformadores, las resistencias de las redes de puesta tierra de la estación a tierra y se debe calcular el flujo en las diferentes ramificaciones. Generalmente, el grado de saturación no es grave para la mayoría de los transformadores de red pequeños (<200 MVA), ya que normalmente son trifásicos, de tres patas. Las grandes unidades monofásicas y las grandes unidades trifásicas, que a menudo tienen cinco patas para reducir la altura con el fin de facilitar



el transporte, están en mayor riesgo y deben evaluarse individualmente para determinar la posibilidad de saturación.

6.2.2 Objetos metálicos enterrados

Los objetos metálicos en el suelo o en contacto con el suelo pueden dividirse en tres categorías:

1. Objetos no aislados tales como metales que están directa y continuamente en contacto con el suelo circundante.
2. Objetos recubiertos con material aislante como polietileno (normalmente con protección catódica).
3. Sistema (malla enterrada) de puesta a tierra de las estaciones interconectadas con hilos de guarda y si hay, transformadores con neutros conectados a tierra, a través de los conductores de línea de CA.

6.2.2.1 Objetos metálicos no aislados

Ejemplos de objetos metálicos no aislados son: (a) pantallas o armaduras de cables en contacto con el suelo; (b) pantallas o armaduras de cables submarinos en contacto con el agua; (c) tuberías metálicas y tanques metálicos directamente enterrados sin aislamiento.

Dependiendo de la orientación del objeto metálico, su longitud en la dirección del campo y la fuerza del campo (que depende de las propiedades del suelo y la corriente aplicada), el objeto recoge la corriente en la parte más cercana al electrodo anódico y descarga la corriente desde la parte más cercana al electrodo catódico.

Para determinar el impacto, es útil calcular la densidad de corriente en el objeto afectado, a menudo expresada en $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ ($1 \mu\text{A} / \text{cm}^2 = 0.01 \text{ A} / \text{m}^2$) [32], [18], [28], [19] y [23]. En 1962, el profesor S. Rusck de origen sueco [33], discutió la cuantificación de la corrosión debido a las corrientes de CD parásitas o vagabundas. Él concluyó que podría permitirse una densidad de corriente de $1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ para el hierro no protegido. Esto corresponde a una tasa de corrosión de 0.01162 mm por año de la superficie de un objeto de hierro.

Este efecto necesitaría ajustarse en proporción a los amper-hora de operación del electrodo. El Dr. Kimbark también realizó una investigación exhaustiva de la corrosión debido a la captación y descarga de corriente de tierra en CD [33]. Otro enfoque notable, basado en la definición de una constante de tiempo de corrosión, fue desarrollado por Uhlmann [34]. Este enfoque muestra la ventaja de permitir la estimación de la corrosión de una manera más simple cuando el electrodo es operado de manera esporádica, como en las plantas modernas con



arreglo bipolar [34].

Además de las corrientes de tierra en CD, los objetos metálicos no protegidos en el suelo se corroerían por razones "naturales" como diferencias locales en la composición del suelo a lo largo del objeto metálico, contacto con metales o química del suelo diferentes, y corrientes telúricas naturales que también causan posibles diferencias en el suelo y hacen que la corriente entre y salga de los objetos metálicos. El impacto de las corrientes telúricas naturales puede ser mayor que el impacto de una estación de electrodo a distancias superiores de 66 a 110 km de la estación de electrodo. Kimbark [33] llegó a una conclusión similar.

Si un EPT en HVDC está ubicado cerca de cables enterrados de CA, o cables submarinos en CD, es importante investigar el riesgo de corrosión del blindaje del cable, ya que normalmente no está aislado eléctricamente del suelo o el agua de mar circundante.

La protección más obvia y menos complicada para la infraestructura metálica en el fondo del mar contra las corrientes parásitas del funcionamiento del electrodo se puede lograr ubicando el electrodo a una distancia de varios kilómetros (como guía general > 10 km del electrodo de tierra), lejos de objetos que puedan estar sujetos a la corrosión. Debe realizarse una investigación más detallada en caso de que la distancia sea menor que 10 km.

6.2.2.2 Objetos metálicos aislados

Los grandes objetos metálicos aislados son principalmente tuberías revestidas para petróleo o gas, ubicadas en tierra. Es normal tener juntas aislantes, con espaciamientos de 10-100 km, que dividen el tubo metálico en secciones separadas eléctricamente. Cada sección está equipada con un dispositivo para protección catódica, que genera una tensión que se mide contra el suelo circundante a través de una semi-celda Cu-CuSO₄ (cobre - sulfato de cobre) y es aproximadamente -1,0 V. El nivel de tensión preferido puede variar según la composición del suelo en un rango entre - 0.85 V y -1.1 V. Pero bajo condiciones anaeróbicas (falta de oxígeno) el margen está limitado a ± 0.05 V. Si la tensión es "demasiado positiva", existe el peligro de descarga de corriente, lo que significa corrosión. Si la tensión es "demasiado negativa", puede ocurrir la fragilización del acero por hidrógeno generando un punto defectuoso. Los puntos defectuosos son a menudo inevitables poros en el recubrimiento, debido a una producción imperfecta, o daños durante o después de la instalación.

Cuando una sección de una tubería aislada tiene que atravesar un volumen de suelo con potenciales generados por la corriente que circula en el electrodo de tierra, debe limitarse el valor de la diferencia de tensión resultante entre la tensión variable en el suelo y la tensión constante impresa en el tubo, al margen mencionado anteriormente. Si el margen es mayor,



se requerirán juntas aislantes adicionales.

El trabajo de insertar más juntas aislantes en la tubería puede requerir interrupciones de la tubería por varios días. Para evitar gastos, especialmente los relacionados con la interrupción de la tubería, el potencial-suelo requerido de la tubería a veces puede mantenerse introduciendo nuevos esquemas de protección catódica, o modificando las instalaciones de protección catódica existentes.

6.3 Impactos en el ambiente

6.3.1 Impacto en flora y fauna

La hipoxia (deficiencia de oxígeno), el estrés hídrico y los impedimentos mecánicos para el crecimiento de las raíces cambian cuando se altera el contenido de agua del suelo [35]. El secado del suelo como resultado del flujo de corrientes de CD terrestre puede afectar el crecimiento de las plantas dependiendo de la estructura del suelo y el tipo de planta [36].

El umbral máximo de temperatura del suelo en la interfaz electrodo-suelo se considera típicamente como 85 °C y los niveles de temperatura por encima de este umbral pueden dar como resultado la formación de vapor. Cuando el vapor queda atrapado dentro del suelo, puede desarrollar presiones excesivas que pueden conducir a la explosión del electrodo [23].

La electro-ósmosis se refiere al movimiento de agua por la corriente eléctrica; el agua tiende a alejarse del electrodo anódico durante este proceso. El suelo alrededor del electrodo de tierra puede secarse relativamente más rápido y se debe evitar la proximidad de los electrodos a la tierra utilizada para la agricultura. El secado del suelo juega un papel importante en el crecimiento de la hoja, ya que restringe la expansión e iniciación de la hoja [35]. La fotosíntesis es menos afectada que el crecimiento de la hoja. El calentamiento del suelo también reduce el contenido de humedad del suelo. No se ha encontrado información que relacione la duración del calentamiento del suelo.

Se ha demostrado que una gran variedad de organismos responde a señales geomagnéticas, que incluyen: bacterias magnetotácticas (bacterias que utilizan orgánulos para la navegación geomagnética), protistas (unicelulares primitivas), gasterópodos (moluscos de concha), crustáceos (langostas, cangrejos, etc.), insectos, peces óseos, anfibios, tortugas marinas, aves y ballenas migratorias [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45] y [46]. Esto ha generado una preocupación de afectación ambiental para la flora y la fauna marinas desde los inicios de la instalación de electrodos de puesta a tierra en el mar.

Los campos magnéticos en el mar no están relacionados con el electrodo en sí, sino con un



efecto de flujo de corriente en el funcionamiento monopolar con un solo cable HVDC. El mismo problema aparecerá en el caso de dos cables bipolares de CD que sigan rutas espaciadas por separado [47]. Se han realizado varios estudios para evaluar el impacto de los electrodos de mar y los principales resultados muestran que no se debe esperar ningún impacto ambiental si los electrodos están diseñados adecuadamente.

6.3.2 Aspectos químicos

En cualquier proceso electrolítico, siempre habrá reacciones químicas porque los materiales en el suelo (más precisamente las sustancias diluidas en el suelo o agua de mar) se descompondrán y/o podrán reaccionar entre sí o con los componentes metálicos en el electrodo para producir nuevos compuestos químicos [48].

En un proceso anódico en aguas subterráneas de salinidad muy baja o cero, se genera O_2 (oxígeno), que generalmente no se considera problemático porque la atmósfera contiene aproximadamente 20% de O_2 . Con el aumento de la salinidad, la evolución del Cl_2 (cloro) será más dominante, pero aún habrá una evolución sustancial de O_2 incluso en agua de mar de alta salinidad. La suma de los gases desarrollados debe seguir la ley de electrólisis de Faraday, que dice que la masa del material descompuesto es proporcional a la carga eléctrica intercambiada entre el electrodo y el número de amper-hora.

La suma de la evolución de Cl_2 y O_2 asciende a aproximadamente 327 mol/A año. Una compañía que ha entregado electrodos recubiertos de malla de titanio ha brindado la siguiente información sobre el ánodo de la estación de electrodos de Baltic Cable en Smyge:

"A la salinidad de este sitio (alrededor de 0,8 por ciento), la corriente nominal de 1364 A produce Cl_2 / O_2 en cantidades relativas de 30/70 por ciento. La fracción de Cl_2 evolucionado como una relación a la suma de Cl_2 y O_2 se denomina selectividad para Cl_2 , que es 30%. Al 50% de la corriente nominal, las selectividades para Cl_2 / O_2 son aproximadamente 17/83 por ciento, y al 20 por ciento de la corriente nominal 9/91 por ciento. La tasa de evolución absoluta es proporcional a la corriente, lo que significa que la tasa absoluta de evolución de Cl_2 se reduce en un factor de 16,7 cuando la densidad de corriente del electrodo se reduce en un factor de 5 [13]. Por lo tanto, el método obvio para disminuir la evolución de cloro es utilizar densidades de corriente bajas, lo que significa electrodos de gran tamaño.

La selectividad del cloro de la malla de titanio varía con la composición del material del electrodo y tiende a aumentar con:

- La mayor salinidad.
- El menor pH.



- El mayor potencial y densidad de corriente.
- La reducción de temperatura en el agua

Los materiales como el coque y el grafito soportan la inversión de corriente, mientras que el hierro con alto contenido de silicio es menos tolerante, debido a que una capa de SiO₂ (dióxido de silicio – sílice) en la superficie explota causando picaduras. Sin embargo, si se instala suficiente material, cualquier picadura que ocurra puede no afectar significativamente la vida útil del electrodo. Del mismo modo, el titanio y el titanio recubierto, que soportan muy bien las duras condiciones anódicas, son muy sensibles a la inversión de la polaridad y no pueden resistir condiciones catódicas. Incluso se ha expresado una advertencia contra las muy bajas densidades de corriente y la combinación de ondulación y baja densidad de corriente. Una compañía que produce electrodos de titanio ha indicado que se están llevando a cabo investigaciones para desarrollar materiales de electrodos metálicos con una capacidad de corriente catódica mejorada.

6.4 Medidas de mitigación

Los problemas ambientales relacionados con la operación con retorno por tierra y las medidas de mitigación para posibles interferencias se condensan con más detalle en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Impacto y medidas de mitigación del electrodo [13].

Casos	Impacto ambiental	Área de impacto	Variable física primaria que define el impacto	Medidas de mitigación
GENERAL				
Efectos en la infraestructura subterránea o puesta a tierra metálica nueva y existente en las proximidades del electrodo	Las diferencias de potenciales pueden causar perturbaciones en los circuitos de telecomunicaciones: teléfonos, sistemas de señalización ferroviaria.	Extendido	Potencial eléctrico y magnitud de ondulación que afecta los sistemas de conexión a tierra.	Seccionar la línea de ferrocarril para crear aislamiento eléctrico en las vías del tren. Las perturbaciones en los circuitos de telecomunicaciones pueden mitigarse reemplazando los conductores metálicos y los cables de fibra óptica blindados metálicamente con cables de fibra óptica que tienen blindaje de plástico. La comunicación por radio también se puede considerar. Los expertos electrónicos pueden considerar otras soluciones electrónicas.
Efectos en la infraestructura subterránea o puesta a tierra metálica nueva y	La corriente a través de la infraestructura metálica causa la corrosión de estructuras, tuberías metálicas enterradas, cables, cercas, líneas telefónicas y vías férreas. Otra infraestructura metálica	Extendido	La Densidad de corriente a través de la infraestructura	Tuberías en tierra: Juntas aisladas Seccionar cercas o reemplazar postes de acero con postes de madera. Seccionar la línea de ferrocarril, como aislamiento eléctrico en las vías del tren.



existente en las proximidades del electrodo.	grande y cercana, como puentes, puesta a tierra o sistemas de protección catódica de tanques enterrados, puede verse afectada si están lo suficientemente cerca del electrodo.		metálica, multiplicada o por el número de horas de operación será la vida útil del electrodo.	Los sistemas pasivos o activos de Protección Catódica deben ser considerados y / o ajustados, si ya existen.
Efectos en la infraestructura subterránea o puesta a tierra metálica nueva y existente en las proximidades del electrodo	El aumento de la diferencia de potencial del suelo puede causar un potencial de contacto peligroso debido a la gran transferencia de potencial.	Extendido	Potenciales eléctricos entre dos puntos.	La transferencia de potencial en los circuitos de telecomunicaciones puede mitigarse aislándolos de la tierra en la cercanía del electrodo. Seccionar cercas o reemplazar postes de acero con postes de madera. Proteger los sistemas grandes de riego radial restringiendo el tamaño o seccionando para reducir la longitud de las secciones conductoras.
Efectos en la infraestructura eléctrica existente y futura (líneas HV, MV y LV, transformadores)	Líneas HV y MV. Para estructuras tipo torre (metálicas y de madera) conectadas a tierra con hilos de guarda, las corrientes de CC pueden fluir en hilo de guarda y pueden causar corrosión del cable de tierra o barras. La cantidad de corriente que fluirá depende de la diferencia de potencial entre las torres y las características del suelo. Para las estructuras o torres de madera que no están conectadas a tierra, no se prevén problemas.	Extendido	Inyección de corriente total y densidad de corriente a través de sistemas de puesta a tierra multiplicada o por el número de horas de funcionamiento en la vida útil del electrodo.	Líneas HV y MV. Para las líneas de AT y MV existentes, el hilo de guarda podría aislarse por secciones de la línea que se encuentran dentro del área de influencia. Para garantizar una protección adecuada de la línea contra los rayos, el hilo de guarda se puede conectar a la torre a través de un supresor de baja tensión o dejarlo aislado y proporcionar que la corriente se descargue fácilmente después de un rayo. Se podrían implementar medidas de mitigación similares para líneas futuras.
Efectos en la infraestructura eléctrica existente y futura (líneas HV, MV y LV, transformadores)	Transformadores sólidamente aterrizados proporcionan un camino de retorno para las corrientes de CC a través de líneas (fases) entre dos subestaciones. Las corrientes de CC en un transformador pueden causar la saturación del transformador y/o las operaciones de protección. Para transformadores no conectados a tierra esto no es un problema.	Extendido	Inyección de corriente total a través del neutro	Transformadores. La corriente de CC se puede limitar a niveles aceptables mediante la adición de una resistencia o un condensador en el neutro del transformador. Se puede conectar un supresor de sobretensión en paralelo a la resistencia para garantizar que no se infrinjan los niveles de aislamiento. Agregar un condensador en serie con las fases. Transformadores de aislamiento en sistemas de distribución de baja tensión.
ELECTRODOS DE TIERRA Y COSTA				
Campos Eléctricos	Posible peligro para humanos y animales debido a los altos potenciales de paso y contacto cerca del sitio del electrodo.	Local	Potencial eléctrico y/o campo eléctrico en el	Ajuste el tamaño y la profundidad de instalación para lograr niveles aceptables de potenciales paso y contacto, de diseño para asegurar bajas densidades de corriente; en



			suelo.	la superficie del electrodo.
ELECTRODOS DE TIERRA				
Suelo en el sitio del electrodo	Posible calentamiento, secado y emisión de gases en el suelo cerca del sitio del electrodo debido a la electroósmosis (movimiento de agua lejos de los ánodos, lo que reduce los niveles de humedad). Si este fenómeno no se controla, la tierra se puede secar y sus propiedades pueden cambiar permanentemente y el electrodo podría dañarse permanentemente.	Local	Densidad de corriente en las partes activas del electrodo por el tiempo máximo de operación del electrodo.	regar el suelo para evitar que se seque si es necesario. Instalar el electrodo en coque para asegurar la transferencia o conducción de corriente por a través del coque al suelo. Esto también logrará bajas densidades de corriente en el suelo lo que ayudará a evitar la electroósmosis o problemas de calentamiento.
MAR				
Productos de la electrólisis del ánodo	Se puede formar productos de electrólisis como hipoclorito, cloruro, hipobromito, bromuro, cloroformo y bromo formó. Las preocupaciones ambientales se relacionan principalmente con la flora y fauna marina.	Local	Densidad de corriente en las partes activas del electrodo.	La cantidad de cloro puede reducirse con un diseño adecuado del electrodo. Mantener un valor de PH bajo en la superficie del electrodo asegurando un intercambio suficiente de agua de mar. Disminuir la densidad de corriente en el agua aumentando la superficie/tamaño del electrodo. Uso de materiales de electrodo favorables.
Aumento de la temperatura del agua	Posible calentamiento e incluso hasta el punto de ebullición del agua en contacto. Las preocupaciones ambientales se relacionan principalmente con la flora y la fauna marinas que pueden estar en contacto con electrodo.	Local	Densidad de corriente en las partes activas del electrodo.	El riesgo de calentamiento solo se puede reducir mediante medidas de diseño tales como aumentar el tamaño del electrodo para reducir la densidad de corriente.
Campos eléctricos	Impacto en buzos, peces y vida marina	Local	Campo eléctrico	El electrodo podría estar enterrado en el lecho marino. El área del electrodo podría estar cercada para peces y vida marina. Disminuir la densidad de corriente en el agua al aumentar la superficie/tamaño del electrodo. Las partes activas del electrodo se pueden asegurar con recubrimiento de concreto.
Campos magnéticos	Impacto en peces y vida marina. Desviación de la brújula magnética en aguas poco profundas debido a campos magnéticos de alta corriente un solo cable.	Local/Externo	Campo magnético	Relacionado con un solo cable de electrodo. No es fácil de mitigar a menos que los cables HVDC puedan colocarse uno cerca del otro. Evite las rutas marinas. Un electrodo de tierra reducirá el impacto de un solo cable al electrodo, pero debe tenerse en cuenta el efecto en humanos/vida marina. El cable del electrodo y los cables HVDC con corrientes opuestas pueden estar juntos.



Capítulo 7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

7.1 Introducción

En el siguiente capítulo, se describen las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros de esta tesis.

7.2 Conclusiones

Por lo regular, el Electrodo de Puesta a Tierra (EPT) del sistema HVDC es confundido con el Sistema de Puesta Tierra (SPT) del sistema HVAC, sin embargo, la funcionalidad es diferente, porque el EPT realiza el retorno de la corriente nominal del sistema por tierra, y los sistemas en corriente directa necesitan de un polo positivo y uno negativo (refiere el sistema a “0” volts), la infraestructura del polo positivo es a través de un conductor, mientras que el polo negativo se puede hacer por retorno metálico o por tierra, en este último, la infraestructura es un EPT de dimensiones robustas que cumple con criterios de diseño más complejos que el electrodo de un SPT en corriente alterna, motivo de estudio de este trabajo de tesis.

De acuerdo con el análisis del acervo bibliográfico, se identificaron las principales configuraciones de los sistemas HVDC, en los que se requiere para su operación un EPT, que son las configuraciones bipolar y monopolar.

Se definieron los parámetros necesarios para el diseño del EPT, como son: selección del sitio, parámetros nominales del sistema HVDC, estudios preliminares de impacto ambiental, materiales, parámetros de diseño, investigación geofísica y geológica y, aspectos económicos, entre otros, con la finalidad de determinar el arreglo más conveniente.

Del análisis consensuado de normas internacionales y artículos técnicos, se propone un procedimiento de diseño para el EPT para sistemas HVDC. Este procedimiento consta de 20 pasos que se deben seguir para el buen funcionamiento del electrodo, que debe cumplir con una impedancia de 0.1 a 0.3 Ω , que garantiza la referencia a “0 volts” del retorno por tierra del sistema. EL procedimiento se valida con el diseño de un electrodo terrestre de anillo simple y doble para un sistema monopolar/bipolar,



cumpliendo con la impedancia de máxima 0.3Ω .

Concluido el diseño, se instalará en campo y se evaluarán los parámetros que deben ser monitoreados y evaluados durante la puesta en servicio del sistema HVDC.

La validación se realizará de acuerdo con la desviación entre los parámetros de diseño y los monitoreados (temperatura, humedad, resistencia de puesta a tierra, potenciales de contacto y paso), determinando las medidas de mitigación para el impacto causado a infraestructura y medio ambiente.

De acuerdo con las referencias técnicas consultadas, para construir un EPT se requiere al menos 10 kilómetros de separación entre la estación convertidora, infraestructura o población más cercana, lo cual llega a ser una limitante, optando por el uso de un retorno metálico para la trasmisión de la energía eléctrica de un sistema HVDC.

7.3 Trabajos Futuros

Durante el desarrollo del trabajo de tesis, se identificó una actividad que daría continuidad y mayor soporte a este trabajo, modelando los potenciales transferidos del electrodo a cualquier equipo adyacente al EPT. Para el cual es necesario realizar 2 modelos que caractericen, 1) el electrodo con los parámetros obtenidos del diseño y 2) el suelo homogéneo o heterogéneo. Utilizando un algoritmo y los modelos, se pretende estimar la diferencia de potencial transferido en suelos con más de una capa, con la finalidad de determinar la distancia máxima de afectación, con algún elemento cercano al EPT.

Otros temas adicionales, son el diseño del bus de enlace y sistema de control, que interconecta el EPT con la estación convertidora, el cual puede ser aéreo o subterráneo, su dimensionamiento depende de la corriente que se inyectará al suelo.



Referencias Bibliográficas

- [1] Monterrubio Diez Mario, (2013). "Transporte de energía eléctrica en corriente, Enlaces HVDC-VSC", Universidad de Valladolid.
- [2] Proyectos de Siemens en HVDC, (2019). www.energy.siemens.com.
- [3] Gunnar Asplund, Revista ABB. (2007). "Transmisión de ultra alta tensión", www.library.abb.com.
- [4] J. Arrillaga, Liu Y. H., y Watson, N.R. (2007). "FLEXIBLE POWER TRANSMISSION, The HVDC Options", John Willey & Sons, ISBN 978-0-470-05688-2 (HB).
- [5] IEC 61975:2010, (2010). "High-voltage direct current (HVDC) installations - System tests".
- [6] IEC/TS 62344, (2013). "Design of earth electrode stations for high-voltage direct-current (HVDC) links".
- [7] IEC TR 60919-1, (2017). "Performance of high voltage current (HVDC) systems with line-commuted converters – Part 1: Steady-state conditions".
- [8] IEC 60919-2, (2008). "Performance of high voltage current (HVDC) systems with line-commuted converters – Part 2: Faults and switching".
- [9] IEC 60919-3, (2008). "Performance of high voltage current (HVDC) systems with line-commuted converters – Part 3: Dynamic conditions".
- [10] J.Mooney, (2010). "Electrical considerations for HVDC transmission lines", Power Engineers, Registered Continuing Education program RCEP.
- [11] M. Baharman and B. Johnson, (2007). "The ABC of HVDC transmission technologies, IEEE Power and Energy Magazine.
- [12] P.Girdinio, P.Molfino, M.Nervi, M.Rossi, A.Bertani and S.Malgarotti, (2015). "Technical and Compatibility issues in the Design of HVDC Sea Electrodes", International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE).
- [13] CIGRE-675, (2017). "General Guidelines for HVDC Electrode Design", Working Group WG B4.61.
- [14] CIGRE-388, (2009). "Impacts Of HvdC Lines On The Economics Of HvdC Projects", Joint Working Group B2/B4/C1,17.
- [15] N.G.Hingorani, (1974). "Monopolar metallic return operation of long distance HVDC transmission systems", IEEE Transactions and Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-93, issue 2, pp 554-563.
- [16] H. Hamzebahmani, H.Griffiths, A.Haddad, D.Guo, (2015). "Earthing Requirements for HVDC Systems", IEEE 2015, Universities Power Engineering Conference (UPEC), International.
- [17] EPRI EL-2020, (August 1981). "HVDC ground electrode design". Working Group Project 1467-1.
- [18] Edward Wilson Kimbark, (1971). "Direct Current Transmission", Volumen I



- [19] CIGRE Working Group, (29 de Julio 1998). "General Guidelines for the Design of Ground Electrodes for HVDC Links".
- [20] José Telles, Carlos Madeiros Portela, (2003). "Soil Heating Around the Ground Electrode of an HVDC System by Interaction of Electrical, Thermal, and Electroosmotic Phenomena", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, NO. 3.
- [21] D. Kovarsky, L. J. Pinto, C. E. Caroli, N. Santos, (1988). "Soil Surface Potentials Induced by Itaipu HVDC Ground Return Current. Part I – Theoretical Evaluation", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3.
- [22] Richard J. Holt, John Dabkowski, Ronald L. Hauth, (1997). "HVDC Power Transmission Electrode Siting and Design", ORNL/Sub/95-SR893/3.
- [23] IEC Pre-Standard, (2007). "General Guidelines for the design of ground electrodes for high-voltage direct current (HVDC) links", IEC PAS 62344, 1ra edición.
- [24] Fan Chen, Bo Zang, Jinliang He, (2008). "Influence of coke bed on HVDC Grounding Electrode Heat Dissipation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6.
- [25] IEC 60479-1, (2008). "Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects".
- [26] IEC 60479-3, (1998). "Effects of current on human beings and livestock - Part 3: Effects of currents passing through the body of livestock".
- [27] IEEE 80-2013, (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
- [28] M.R. Nielsen on behalf of CIGRÉ Working Group 14.21, (1998). "Summary of Existing Ground Electrode Designs"
- [29] Working Group 14.21 TF2, (1998). "General Guidelines for the Design of Ground Electrodes for HVDC".
- [30] Charles F. Dalziel - E.A.R.M. /1961/ D2, (1962). "Deleterious Effects of Electric Shock – , International Labour Office".
- [31] IEEE 81-2012, (2012). "IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a grounding system".
- [32] Research Project 1467-1 EPRI EL-2020, (1981). "HVDC Ground Electrode Design", International Engineering Company Inc. for Electric Power Research Institute.
- [33] S. Rusck, (1962). "H.V.D.C. Power Transmission: Problems Relating to Earth Return," by, Direct Current, Vol. 7, pp. 290-298 and 300,. "Risk of corrosion in field of electrode on sea shore and design of land electrode".
- [34] Uhlmann E. Power, (1975). "Transmission by Direct Current", Book, Berlin-New York.
- [35] H. Lambers, F.S. Chapin III, T.L. Pons, (2008). "Plant Physiological Ecology", Book pp. 348. Second Edition.



- [36] Nombuyiselo Molosiwa, Nishanth Parus, Aubrey Phale, "Environmental Regulations and Legislations on HVDC Earth Electrodes".
- [37] Kirschvink. J.L., (1980). "South Seeking Magnetic Bacteria", *Journal of Experimental Biology*. 86: 345-347.
- [38] Bazylnski, D.A., D.R. Schlezinger, B.H. Howes, R.B. Frankel and S.S. Epstein. (2000). "Occurrence and Distribution of Diverse Populations of Magnetic Protists in a Chemically Stratified Coastal Salt Pond", *Chemical Geology*. 169: 319-328. DOI:10.1016/S0009-2541(00) (00211-4).
- [39] Lohmann, K.J. and A.O.D. Willows, (1987). "Lunar-modulated Geomagnetic Orientation by a Marine Mollusk", *Science*. 235: 331-334.
- [40] Lohmann, K.J., N.D. Pentcheff, G.A. Nevitt, G.D. Stetten, R.K. Zimmer-Faust, H.E. Jarrard and L.C. Boles, (1995). "Magnetic Orientation of Spiny Lobsters in the Ocean: Experiments with Undersea Coil Systems". *The Journal of Experimental Biology*. 198: 2041-2048.
- [41] Riveros, A.J and R.B. Srygley, (2010). "Magnetic Compasses in Insects. *Encyclopedia of Animal Behaviour*". 2: 305-313.
- [42] Walker, M.M. (1984). "Learned Magnetic Field Discrimination in Yellowfin Tuna, *Thunnus albacares*". *Journal of Comparative Physiology A*. 155: 673-679.
- [43] Diego-Rasilla, F.J., R.M. Luengo and J.B. Phillips., (2010). "Light-dependent Magnetic Compass in Iberian Green Frog Tadpoles". *Naturwissenschaften*. 97: 1077-1088.
- [44] Goff, M., M. Salmon and K.J. Lohmann. (1995). "The Magnetic Compass of Loggerhead Sea Turtle Hatchlings: Calibration by Surface Waves", In *Proceedings of the Fifteenth Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation*. NOAA Technical memorandum NMFS-SEFCS-387. p. 105.
- [45] Wiltschko, R., D. Gehring, S. Denzau and O. Güntürkün, (2010). "Interaction of Magnetite Based Receptors in the Beak with the Visual System Underling 'Fixed Direct' Responses in Birds", *Frontiers in Zoology*. 7: 24-29.
- [46] Kirschvink, J.L., A.E. Dizon and J.A. Westphal, (1986). "Evidence from Strandings for Geomagnetic Sensitivity in Cetaceans". *Journal of Experimental Biology*. 120: 1-24.
- [47] Magnus Akke, Karl Heinz Lampe, (1995). "Non-linear interaction of DC cables and magnetically controlled ship-steering autopilots *IEEE Transactions on Control Systems*", Vol. 3, No. 4,
- [48] Antonio B.S. Poléo & Morten Harboe Jr. (1996). "High Voltage Direct Current (HVDC) Sea Cables and Sea Electrodes: Effects on Marine Life", *Institute of Biology, University of Oslo*.