



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE EFECTO CATÓDICO PARA
TANQUES DE COMBUSTIBLE.**

César Guillermo Ché Socoy

Asesorado por el Ing. MSc. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE EFECTO CATÓDICO PARA
TANQUES DE COMBUSTIBLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

CÉSAR GUILLERMO CHÉ SOCOY

ASESORADO POR EL ING. MSc. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Adolfo René Hernández Hernández
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo.
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE EFECTO CATÓDICO PARA TANQUES DE COMBUSTIBLE,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 13 de mayo de 2009.

César Guillermo Ché Socoy

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala 16 de septiembre del 2009

Señor Director

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería.
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Sistema de puesta a tierra de efecto catódico para tanques de combustible”** desarrollado por el estudiante **César Guillermo Ché Socoy**; con base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos por lo cual el estudiante y mi persona nos hacemos responsables del contenido del mismo.

Sin otro particular, me suscribo ante usted.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink that reads "Otto Fernando Andrino González".

Ing. MSc. Otto Fernando Andrino González
Colegiado 4038



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 38.2009
Guatemala, 22 de septiembre 2009.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
"Sistema de puesta a tierra de efecto catódico para tanques de
combustible", del estudiante César Guillermo Chè Socoy, que
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino Gonzalez
Coordinador Area de Electrotécnica



OFAG/sro

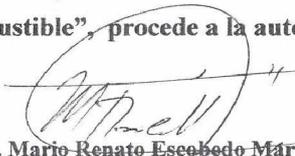
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 61. 2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; César Guillermo Ché Socoy titulado: "Sistema de puesta a tierra de efecto catódico para tanques de combustible", procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 24 DE SEPTIEMBRE 2,009.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 412.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE EFECTO CATÓDICO PARA TANQUES DE COMBUSTIBLE**, presentado por el estudiante universitario **César Guillermo Ché Socoy**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2009



/gdech

ÍNDICE GENERAL.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	1
1.1 Conceptos básicos de puestas a tierra.....	3
1.1.1 Sistema de puesta a tierra (SPT).....	4
1.1.2 Puesta a tierra.....	4
1.1.3 Puesto a tierra.....	5
1.1.4 Tierra.....	5
1.2 Tipos de sistemas de puesta a tierra.....	5
1.2.1 Tierra física o sistema de electrodo a tierra.....	6
1.2.2 Tierra de protección contra rayos.....	7
1.2.3 Sistema de tierra de equipo o tierra de seguridad.....	8
1.2.4 Sistema conductor conectado a tierra o conductor neutro.....	9
1.2.5 Sistema tierra aislada.....	10
1.2.6 Sistema tierra de referencia de señal.....	11
1.3 Conexión efectiva a tierra.....	13
1.4 Elementos que intervienen en la puesta a tierra.....	15
1.4.1 Electrodo de puesta a tierra.....	15
1.4.2 Componentes del sistema electrodo de tierra.....	16
1.4.3 Funciones del electrodo de tierra.....	27

1.4.4 Varilla de tierra.....	29
1.4.5 Técnicas de conexión a tierra para el sistema electrodo de tierra.....	31
1.5 Conductor del electrodo de puesta a tierra.....	33
1.5.1 Instalación y protección del conductor de tierra.....	35
1.5.2 Calibración del conductor del electrodo de tierra.....	35
1.5.3 Selección del conductor del electrodo de tierra de CD.....	38
1.5.4 Selección del conductor del electrodo de tierra de AC.....	38
1.5.5 Conectores y accesorios.....	40
1.5.5.1 Conectores atornillados.....	40
1.5.5.2 Conectores a presión.....	40
1.5.5.3 Conectores soldados con soldadura exotérmica....	40
1.6 Tipos de soldaduras en uniones de puesta a tierra.....	41
1.6.1 Ventajas técnicas de la soldadura.....	42
1.6.2 Utilización y manejo de la soldadura.....	42
2. SUELO.....	45
2.1 El suelo como un medio de aterrizaje.....	45
2.2 Estructura y selección del modelo del suelo.....	46
2.3 Clasificación de los suelos y rango de resistividad.....	46
2.3.1 Resistividad del suelo.....	46
2.3.2 Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra.....	47
2.4 Características del suelo para la puesta a tierra.....	48
2.4.1 Gradiente de voltaje en el suelo.....	48
2.4.2 Efecto de la magnitud de corriente.....	50
2.4.3 Uso de capas de material superficial.....	51
2.5 Factores que afectan el sistema de puesta a tierra.....	52
2.5.1 Naturaleza del terreno.....	54

2.5.2 Efecto de la humedad, temperatura y contenido químico en el suelo.....	55
2.5.3 Salinidad.....	57
2.5.4 Estratigrafía.....	58
2.5.5 Variaciones estacionales.....	59
2.5.6 Granulometría.....	60
2.5.7 Compactación.....	61
2.6 Mediciones de resistividad del suelo.....	61
2.6.1 Medida de la RPT por medio del medidor tipo pinza.....	64
2.6.2 Medición de la RPT en un sistema multiaterrizado.....	65
2.6.3 Método de caída de potencial.....	67
2.6.4 Medición de la RPT en pararrayos.....	70
2.7 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad.....	70
2.8 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo.....	72
3. EFECTO CATÓDICO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	75
3.1 Electrolito.....	78
3.2 Corrosión.....	78
3.3 Tipos de corrosión.....	80
3.4 Corriente catódica circulando en la red.....	81
3.5 Polarización.....	81
3.6 Control sobre las corrientes circulando en la red de tierras.....	81
3.6.1 Control catódico.....	82
3.6.2 Control anódico.....	82
3.6.3 Control mixto.....	83
3.6.4 Control de resistencia.....	83
3.6.5 Control de difusión.....	84
3.7 Ley de Ohm aplicada al efecto catódico.....	84
3.8 Ley de voltajes de Kirchhoff aplicada al efecto catódico.....	85

3.9 Aplicación del teorema de superposición en las puestas a tierra.....	86
3.10 Métodos de control y protección catódica.....	87
3.10.1 Aislamiento eléctrico.....	87
3.10.2 Protección mediante aplicación de recubrimiento protector...	90
3.10.3 Protección utilizando pinturas y barnices.....	90
3.10.4 Protección utilizando inhibidores de óxidos.....	91
3.10.4.1 Inhibidores de plomo rojo (minio).....	91
3.10.4.2 Inhibidores de zinc.....	91
3.10.5 Protección utilizando materiales resinosos.....	92
3.10.5.1 Resinas fenólicas.....	92
3.10.5.2 Resinas Alquídicas.....	93
3.10.5.3 Resinas de urea.....	93
3.10.6 Métodos electroquímicos.....	93
3.10.7 Protección catódica.....	93
3.10.8 Aplicaciones practicas de la protección catódica.....	95
3.10.8.1 Ánodos galvánicos.....	95
3.10.8.2 Ánodos de sacrificio.....	96
3.10.8.3 Ánodos de zinc.....	96
3.10.8.4 Ánodos de aluminio.....	97
3.10.8.5 Ánodos de magnesio.....	97
3.11 Suelos rectificadores o protección catódica por corriente impresa.	98
3.12 Rectificadores de pulso.....	101
3.13 Tipos de ánodos.....	102
3.14 Corrientes parasitas.....	103
3.15 protección catódica utilizando voltaje impuesto.....	104
3.16 Causas del efecto catódico en los sistemas de puesta a tierra.....	105
3.17 Mantenimiento a los sistemas de puesta a tierra de efecto catódico.....	108

3.18 Consecuencias de malos diseños de los sistemas de puesta a tierra de efecto catódico.....	109
4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA TANQUES DE COMBUSTIBLE.....	111
4.1 Secuencia de diseño.....	112
4.2 Selección de los elementos del sistema de puesta a tierra de efecto catódico para un tanque de combustible.....	112
4.3 Cálculo de la resistencia de un ánodo.....	113
4.4 Cálculo de la corriente de salida de un ánodo.....	113
4.5 Cálculo de la masa anódica total.....	114
4.6 Cálculo del número de ánodos.....	115
4.7 Cálculo del espaciamiento entre ánodos.....	117
4.8 Características técnicas de los elementos de puesta a tierra de efecto catódico.....	117
4.9 Características técnicas de ánodos de magnesio.....	117
4.10 Características técnicas de electrodos de referencia.....	118
4.11 Características técnicas de tomas de potencial.....	119
4.12 Características técnicas de juntas de aislamiento.....	119
4.13 Electrolito y material de relleno.....	120
4.14 Ejemplo de diseño.....	121
4.15 Costo total del proyecto.....	123
4.16 Justificación económica.....	124
CONCLUSIONES.....	127
RECOMENDACIONES.....	129
BIBLIOGRAFÍA.....	131
ANEXOS.....	141

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Tierra física.....	7
2	Tierra de protección contra rayos.....	8
3	Tierra del equipo o tierra de seguridad.....	9
4	Conductor conectado a tierra o conductor neutro.....	10
5	Tierra aislada o delicada.....	11
6	Tierra de señal.....	12
7	Conductor de tierra.....	13
8	Identificación de términos usados en la entrada de la acometida.....	15
9	Tubería metálica de agua como electrodo de tierra.....	17
10	Estructura metálica de un edificio como electrodo de tierra.....	18
11	Electrodo incrustado en concreto (tierra Ufer).....	19
12	Electrodo de tierra que usa una tubería y un electrodo incrustado en concreto.....	21
13	Anillo de tierra.....	22
14	Varillas de tierra.....	23
15	Electrodo como barra electrolítica.....	27
16	Varilla de tierra y resistencia de electrodo de tierra.....	30
17	Gráfica de la resistencia de tierra y la disminución con la profundidad del electrodo.....	31
18	Gráfica del efecto del diámetro de la varilla en la resistencia de tierra	32
19	Empalme del conductor del electrodo de tierra cuando existe más de un interruptor de servicio.....	34
20	Calibre del conductor de tierra.....	39
21	Modelo del suelo.....	45

22	Solapamiento de los gradientes de potencial.....	49
23	Curva de resistencia versus distancia sin solapamientos de gradientes de voltaje.....	50
24	Efecto de la humedad, temperatura y sal sobre la resistividad del suelo.....	57
25	Variación de la salinidad en función del porcentaje de salinidad.....	58
26	Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno....	59
27	Variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales	60
28	Método de Wenner de 4 pines.....	62
29	Megger de 4 terminales.....	64
30	Medición de la RPT utilizando el medidor tipo pinza.....	65
31	Circuito equivalente para un sistema multiaterrizado.....	66
32	Método de caída de potencial para medir la RPT.....	68
33	Gráfica de resistencia de puesta a tierra versus distancia del electrodo (P).....	69
34	Reacción electroquímica.....	76
35	Celda de corrosión electroquímica.....	79
36	Control catódico.....	82
37	Control anódico.....	83
38	Aislamiento eléctrico de CD.....	88
39	Aislamiento de la central eléctrica.....	89
40	Ánodo galvánico.....	96
41	Protección catódica por corriente.....	99
42	Protección de la base de un tanque.....	100
43	Puesta a tierra con tanques con líquido de combustible.....	101
44	Protección catódica mediante voltaje impuesto.....	105
45	Corrosión en concreto contaminado.....	106

TABLAS

I	Tabla para seleccionar el calibre del conductor del electrodo de tierra	37
II	Rangos de resistividad de la tierra.....	46
III	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.....	47
IV	Resistividad de materiales superficiales característicos.....	52
V	Resistividad de acuerdo a la naturaleza del terreno.....	54
VI	Características practicas de algunas aleaciones. Amperios hora de corriente/Amperios año de corriente por cada kilogramo de aleación.....	98
VII	Varios ánodos para corriente impresa.....	103
VIII	Propiedades electroquímicas de ánodos de sacrificio.....	114
IX	Número de ánodos de 4.1 Kg de aleación y alto potencial.....	116
X	Porcentaje de peso del material y cantidad de rellenos por ánodo.....	121
XI	Valores finales de diseño.....	124
XII	Propiedades de los ánodos de sacrificio.....	137
XIII	Factor f de daño, por tipo de recubrimiento.....	138

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
SPT	Sistema de puesta a tierra.
RPT	Resistencia de puesta a tierra.
AC	Corriente alterna.
DC	Corriente directa.
I	Corriente en amperios.
NEC	Código Eléctrico Nacional.
IEEE	Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos.
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares
IEC	Comisión Internacional de Electrotecnia.
R	Resistencia eléctrica.
V	Voltios
μA	Micro amperios.
Ω	Ohmios.
m	Metros

GLOSARIO

Electrodo	Conductor terminal de un circuito, el cual puede ser una varilla rígida, una placa, etc, en contacto con un medio de distinta naturaleza.
Electrodo de medida	Son varillas rígidas de metal en forma de estacas de pequeñas dimensiones, que se clavan en el suelo en los puntos terminales de los circuitos de medida, de corriente y de potencial, asegurando la mínima resistencia eléctrica de contacto durante las medidas.
Electrodo de puesta a tierra	Es un conductor metálico que proporciona el contacto eléctrico con el suelo. Se instala embutido, ya sea directamente en el suelo natural o en el relleno de una excavación. Puede tener diferentes formas.
Puesta a tierra	Comprende toda la ligazón metálica directa, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo. Su objeto es que en el conjunto de instalaciones, edificios o superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el

paso a tierra de las corrientes de falla o la de descarga de origen atmosférico.

Sistema de puesta a tierra

Instalación de seguridad eléctrica en la que un conductor eléctrico desnudo simple o armado es enterrado en el suelo con la finalidad de dispersar corrientes eléctricas y captar el potencial de referencia cero.

Resistencia a tierra

Valor de la resistencia entre un punto cualquiera de una instalación, sea esta parte activa desenergizada o no activa, y la masa terrestre.

Resistencia mutua

Resistencia que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro; su unidad es ohm.

Resistencia aparente

Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de cuatro electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial.

Resistividad del suelo	Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estado del suelo; se obtiene indirectamente a procesar un grupo de medidas de campo, su magnitud se expresa en ohm-metro.
Resistividad equivalente	Es la resistividad obtenida con una medida indirecta, bajo las condiciones que impone un electrodo explorador introducido en el suelo natural.
Suelo	Sistema natural, resultado de procesos físicos químicos y biológicos con componentes principalmente minerales y sólidos inertes que le dan estabilidad, y adicionalmente líquidos y gases que difieren su comportamiento eléctrico.
Suelo homogéneo	Condición ideal de un suelo isotropito y de profundidad infinita que puede ser representado por un solo valor de resistividad, cualquiera que fuera la profundidad del sondeo de las medidas.

Terminal de conexión a tierra

Es un punto propio de la masa o carcasa de un aparato que esta designado para ser conectado solidamente ya sea a la barra equipotencial o al circuito colector.

Tierra

Suelo local de una instalación eléctrica con la que interactúa con un comportamiento conductivo natural regularmente insuficiente.

Tierra remota

También denominada tierra de referencia, es el lugar o la zona de mínima resistencia, más próxima del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de las cuales se le atribuye por convención el potencial cero.

Ánodo

Electrodo de una celda electrolítica en la cual la oxidación es la reacción principal. Es usualmente en el ánodo donde ocurre la oxidación y donde los iones metálicos entran a la solución.

Ánodo de sacrificio	Material más anódico conectado eléctricamente, al material o estructura a proteger, el cual se corroe protegiendo así el electrodo dado.
Ataque selectivo	Corrosión acelerada de una parte del ánodo de sacrificio.
Cátodo	Electrodo de una celda electroquímica en la cual la reducción es la reacción principal.
Celda de corrosión	Celda electroquímica formada entre distintas porciones de metal en una estructura, que resulta en la transformación de una de las porciones de metal de estado metálico iónico.
Celda de referencia	Sistema compuesto por un elemento metálico en un electrolito respecto del cual se mide el potencial electrodo de un elemento metálico en otro electrolito. Generalmente, consiste en una barra de cobre dentro de una solución de sulfato de cobre.
Celda electroquímica	Sistema electroquímico que consiste en un ánodo y un cátodo en contacto metálico, conectados eléctricamente, e inmersos en un electrolito.

Corriente galvánica	Corriente eléctrica entre metales o no metales en un par galvanizo.
Corriente impuesta	Corriente eléctrica suministrada por un dispositivo que emplea una fuente de poder que es externa al sistema electrodo.
Corrosión	Reacción química o electroquímica entre un material, generalmente, un metal y su ambiente, que produce el deterioro del material y sus propiedades.
Corrosión electroquímica	Corrosión producida por el desarrollo de una corriente eléctrica entre partes de una estructura metálica en contacto con un electrolito, lo cual produce la eliminación de iones del metal.
Corrosión galvánica	Corrosión acelerada de un metal debido al contacto eléctrico con un metal más noble en un electrolito corrosivo.
Corrosión termo galvánica	Efecto corrosivo que resulta de la celda galvánica causada por un gradiente térmico a través de la superficie de un metal.

Corrosión uniforme	Corrosión que ocurre aproximadamente a la misma rapidez sobre la superficie de un metal.
Electrolito	Medio conductor a través del cual los iones se mueven constituyendo una corriente en una celda electroquímica.
Noble	La dirección positiva del potencial electrodo.
Par galvánico	Par de conductores disímiles, comúnmente metales en contacto eléctrico.
Polarización	Cambio en el potencial eléctrico de la celda electroquímica debido al paso de corriente
Rapidez de corrosión	La cantidad de corrosión que ocurre por unidad de tiempo.
Reacción anódica	Reacción por oxidación mediante la cual se ioniza los átomos metálicos en el ánodo de una celda electroquímica.
Reacción catódica	Reacción de reducción en la que se forma un producto secundario en forma de gas sódico o líquido en el cátodo de una celda electroquímica.
Reacción de oxidación	Reacción anódica por la cual los electrones son cedidos a la celda electroquímica.

Reacción de reducción	Reacción catódica por la cual son aceptados los electrones de la celda electroquímica.
Reducción	Ganancia de electrones por el contribuyente de una reacción química.
Resistividad	Resistencia eléctrica de una unidad de volumen de un material.
Zonas anódicas	Tramos o porciones de una estructura en donde la corrosión es más severa.
NEC	El código eléctrico nacional, es una norma que establece las reglas de observancia mínima para la instalación segura de conductores, equipos eléctricos, equipos de señalización y comunicación, sistemas de puesta a tierra, etc.

RESUMEN

Los diferentes tipos de sistemas de puesta a tierra, los conceptos básicos generales, los tipos de electrodos y soldaduras a utilizar normalizado por el NEC, necesarios para implementar las puestas a tierra, son los aspectos más relevantes a tratar en el capítulo uno.

El capítulo dos, describe los factores que afectan el sistema de puestas a tierra, factores como estructura y selección del suelo, la resistividad y su medición, la humedad, la temperatura, el contenido químico, el gradiente de potencial y sales y minerales propias del terreno.

El capítulo tres muestra el efecto catódico en el sistema de puesta a tierra, y como a partir de leyes fundamentales de circuitos, leyes de Kirchhoff, ley de Ohm y teorema de superposición se plantearan ecuaciones que predicen las corrientes que circula en la red, además muestra las causas y consecuencias que el efecto catódico ocasiona en el sistema de puesta a tierra, también enumera los distintos métodos de protección catódica, los métodos de protección catódica por medio de ánodos de sacrificio, protección catódica por voltaje impuesto, protección catódica por pinturas, barnices, inhibidores de óxidos, y materiales resinosos que sirven para proteger la red de tierras.

El capítulo cuatro explica el diseño de un sistema de puesta a tierra para tanques de combustible, enumera las características necesarias del equipo a instalar y presenta los resultados del costo económico del diseño.

OBJETIVOS

- **General**

Diseñar un sistema de puesta a tierra de efecto catódico para tanques de combustible.

- **Específicos:**

1. Proporcionar métodos correctos de protección, que permitan evaluar, estudiar y analizar la corrosión en los metales de la puesta a tierra de los tanques de combustible.
2. Analizar el deterioro de los metales en presencia de diferencias de potenciales, debidas a un mal diseño de puesta a tierra.
3. Analizar el tipo de terreno en los cuales es más posible que se dé el efecto catódico por acumulación de sales y minerales propios del terreno.
4. Diseñar un sistema de puesta a tierra de efecto catódico, y mostrar el costo económico que implica implementarlo.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objeto dar a conocer a estudiantes, profesionales, personas individuales e instituciones públicas o privadas la elaboración de un sistema de puesta a tierra de efecto catódico para tanques de combustible, el cual es eficaz y eficiente, tomando en cuenta las normas de construcción de puestas a tierra que rige el NEC.

Para que un sistema de puesta a tierra (SPT) sea funcional, el suelo debe tener baja resistencia, las mediciones de resistencia deben ser precisas y exactas debido a ello se analizan las características del suelo y se muestra las formas de tratarlo para llegar a la resistencia deseada. Además, se analiza el efecto que produce la humedad, la temperatura, los minerales, el contenido químico y el gradiente de potencial en el suelo.

Cuando se entierra un conductor, éste pasa a tener el mismo potencial que la tierra, (cero voltios), éste fenómeno es muy importante pues permite el desarrollo de SPT que sirven para proteger a las personas y al equipo conectado al sistema eléctrico de descargas eléctricas provenientes de rayos y cortocircuitos. Un buen SPT elimina interferencias electromagnéticas, y ruidos provenientes de sistemas eléctricos adyacentes.

La corrosión de los elementos que conforman el SPT es un problema que debe prevenirse desde la raíz. Son demasiadas las medidas que se tienen disponibles para lograrlo, por ejemplo la selección adecuada de los materiales, el tipo de soldadura a emplear, el uso de recubrimientos, la protección catódica, etc.

Cuando existe corrosión galvánica, de inmediato se presentan corrientes galvánicas circulando de un punto a otro en la red, para lograr evitar estas corrientes, se emplean métodos de protección, los métodos de protección utilizando ánodos de sacrificio y corriente impresa son muy efectivos, y son la base para mantenimientos preventivos. El fenómeno catódico es muy complejo y son muchas las variables involucradas en el proceso.

En el capítulo final, se diseña un sistema de puesta a tierra para tanques de combustible, el cual especifica el equipo y las características necesarias para implementar la protección catódica, además, se justifica económicamente la inversión del diseño.

1. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El tema conexión a tierra es difícil, no por los conceptos intrínsecos de la materia, sino principalmente debido, a la interpretación errónea y a la gran cantidad de términos usados. Se habla de tierra, masa, tierra física, tierra del circuito, conductor de tierra, conductor de conexión a tierra, conductor del electrodo a tierra, conductor conectado a tierra, tierra de seguridad, tierra de protección, tierra del equipo, tierra aislada, tierra separada, tierra dedicada, tierra del sistema, tierra de señal, tierra de referencia, etc.

Esta confusión la crean manuales, revistas y artículos específicos, algunas veces escritos por ingenieros especializados en la señal y otras veces por ingenieros de potencia, quienes no siempre están de acuerdo en cuanto a la percepción y solución de estos nuevos problemas.

Las especificaciones y directrices de instalación para la industria electrónica, específicamente las de los fabricantes de equipos electrónicos y computadoras han agravado el problema, ya que muchas, creadas por grandes empresas, han sido escritas por ingenieros, quienes nunca han leído el Código Eléctrico Nacional (NEC).

En los últimos años se ha dado gran importancia al sistema de conexión a tierra, debido a la gran proliferación de equipos electrónicos sensibles, que requieren una tierra libre de ruidos eléctricos. Actualmente la incidencia de tormentas eléctricas, provoca daños en los modernos equipos electrónicos debido a sus prácticas erradas de conexión a tierra. Se puede garantizar por completo que si un SPT está mal instalado o es deficiente, los equipos

electrónicos sufren daños irreparables si se presenta una descarga atmosférica. También se puede garantizar en forma absoluta que el NEC es un libro difícil de leer y se presta a interpretaciones erróneas.

El término tierra aislada lo usan los fabricantes de equipos electrónicos que usualmente exigen una tierra aislada o separada, y malinterpretando el verdadero significado del código solo proveen una terminal para las dos tierras: la tierra de seguridad y tierra aislada, y como consecuencia se pierde la utilidad de la tierra aislada. La función de la tierra aislada es la de proporcionar una referencia cero, libre de ruido para los circuitos electrónicos.

Cuando no se conecta el equipo eléctrico y electrónico a la tierra ya existente, y se realiza un SPT separadamente y específico para el equipo nuevo se da inicio a una práctica errónea y peligrosa que pone en riesgo la vida de las personas y el deterioro o daño irreparable de los equipos eléctricos y electrónicos.

Es importante considerar que el equipo que está alimentado por corriente eléctrica, emite, con mayor o menor intensidad, perturbaciones de distinta frecuencia que pueden abarcar desde simples molestias de audio en un receptor de radio, e interferencia visual en la pantalla de un televisor, hasta inutilizar el servicio de emergencia de un hospital, provocar la interrupción de una comunicación celular.

Todos los sistemas electrónicos sensibles consumen menos del 1% de la energía producida, mientras que el 99% restante los emplean las redes de alumbrado y los motores, es decir, los generadores de interferencias. Incluso los mismos equipos electrónicos digitales generan cierta interferencia que afectan a otros equipos digitales.

Los principios fundamentales no son los mismos para un SPT que funciona a frecuencia de potencia de 60 Hz, que para sistemas expuestos a altas frecuencias ya que los métodos correctos de conexión a tierra para diferentes sistemas dependen del ambiente eléctrico al cual están expuestos.

1.1 Conceptos básicos de puestas a tierra.

Existen varias razones por las cuales los sistemas de alimentación y circuitos deben ser puestos a tierra. La responsabilidad del electrodo de tierra es brindar protección contra las descargas atmosféricas, sobrevoltajes transitorios, contacto accidental con líneas de mayor voltaje, estabilizar el voltaje a tierra durante la operación normal de los equipos.

El conductor conectado a tierra de un sistema aterrizado, establece una trayectoria de baja impedancia para las corrientes de falla y así permite el funcionamiento o activación del interruptor automático de seguridad o interruptor de circuito, para cancelar la falla.

Las razones por las cuales los sistemas y circuitos son puestos a tierra se pueden sintetizar en dos:

1. protección de personal.
2. protección de equipo.

Es un malentendido pensar que la puesta a tierra solo tiene el propósito de mantener todos los equipos y cubiertas metálicas a un plano equipotencial para proteger al personal de un choque eléctrico.

Existen tres razones para poner a tierra los materiales y los conductores que albergan equipos eléctricos, las cuales se detallan a continuación:

1. Para limitar el voltaje a tierra.
2. Para facilitar la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas y los interruptores del circuito.
3. Para drenar a tierra corrientes de fuga de descargas electrostáticas.

La unión entre la tierra del equipo, o tierra de seguridad, y el conductor conectado a tierra o neutro solo se aplica en el tablero principal de distribución y puede realizarla el puente principal de distribución, que esta ubicado en el equipo de servicio, pues es el eslabón clave para que se complete la trayectoria de la corriente de falla y se activen los dispositivos de protección (fusibles) e interruptores termo magnéticos.

1.1.1 Sistema de puesta a tierra (SPT).

Conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones ni fusibles, que unen los equipos eléctricos con el suelo o terreno. Comprende la puesta a tierra y todos los elementos puestos a tierra.

1.1.2 Puesta a tierra.

Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuyen las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende: Electrodo, conexiones y cables enterrados. También se le conoce como toma de tierra o conexión a tierra.

1.1.3 Puesto a tierra.

Toda conexión intencional o accidental del sistema eléctrico con un elemento considerado como una puesta a tierra. Se aplica a todo equipo o parte de una instalación eléctrica (neutro, centro de estrella de transformadores o generadores, carcazas, incluso una fase para sistemas en delta, entre otros), que posee una conexión intencional o accidental con un elemento considerado como puesta a tierra.

1.1.4 Tierra.

Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcaza, armazón, estructura o tubería de agua. El término "masa" solo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos, los carros y otros.

Se entiende por masa a las partes metálicas accesibles de los elementos de la instalación y de los aparatos eléctricos, separados de las partes bajo tensión por su aislamiento funcional.

Con el SPT se busca que las corrientes de falla a tierra encuentren un camino más fácil, que el que ofrecería el cuerpo de una persona que tocara la carcasa metálica bajo tensión. De esta manera el SPT tiene una resistencia menor que la del cuerpo humano, la corriente de falla circulará en la red de tierra, en lugar de circular por el cuerpo de una persona.

1.2 Tipos de sistemas de puesta a tierra.

Los tipos de sistemas de puesta a tierra más comunes son los que se presentan a continuación.

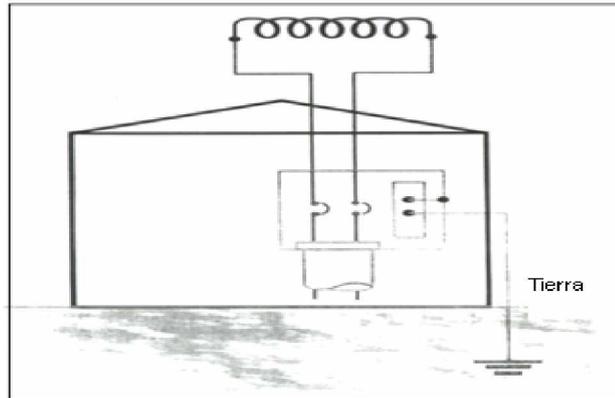
1.2.1 Tierra física o sistema de electrodo a tierra.

Cubre todas las conexiones hechas para realizar un sistema de puesta a tierra efectiva. Esta es solo una parte del sistema pues el resto, es decir la tierra del circuito y la tierra de seguridad o del equipo están arriba de la tierra. No solamente con tener una baja resistencia en el electrodo de tierra se tiene un buen sistema de tierra. Es imperativo considerar el sistema completo de tierra en una instalación eléctrica, con sus tres componentes principales: tierra física, tierra del circuito y tierra del equipo.

El sistema electrodo de tierra o tierra física es un sistema bajo tierra, pero relacionado con las partes existentes por encima de la tierra. La tierra del circuito es el conductor conectado a tierra o conductor neutro, el cual tiene la función en caso de un cortocircuito o falla a tierra, de transportar la corriente de falla cedida por el conductor de tierra del equipo. En el punto neutro-tierra del tablero principal de distribución, el neutro proporciona la trayectoria de baja impedancia, para la corriente de falla, de tal forma que se cierre el circuito, lo que facilita el disparo de los interruptores del circuito.

El sistema de tierra de seguridad, o tierra del equipo, interconecta las partes metálicas de los equipos, que usualmente no acarrearán corriente, para mantenerlos a una referencia cero o plano equipotencial, comúnmente a este término se le llama masa y se usa para diferenciarlo de la tierra física. Este sistema previene peligros para las personas pues en caso de un contacto entre el conductor de fase y la carcasa metálica del equipo, lo mantiene a la misma referencia a tierra. Al no existir diferencias de potencial, no se generan corrientes peligrosas que podrían ser mortales para una persona. Ver figura 1.

Figura 1. Tierra física



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

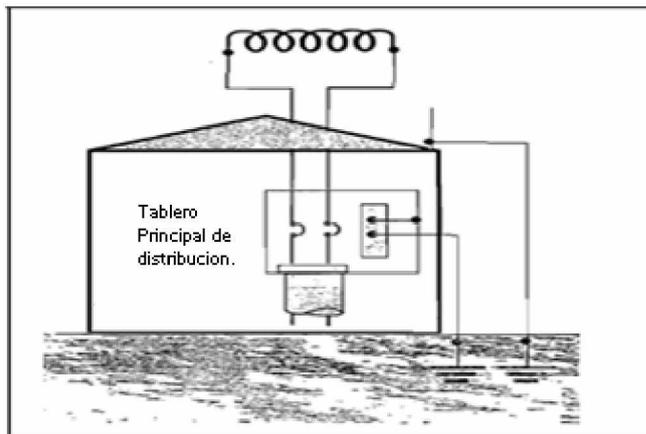
En la figura 1, se ilustra la tierra física o sistema de electrodo de tierra, así mismo se muestra la conexión del electrodo de tierra con la barra de tierra del tablero principal, por medio del conductor del electrodo de tierra. Este punto neutro-tierra es la única conexión del neutro con la tierra que se permite en un sistema eléctrico de distribución de CA.

1.2.2 Tierra de protección contra rayos.

Es un sistema separado que debe conectarse al sistema de tierra del edificio o estructura. La función específica de este sistema es drenar la energía del rayo a tierra, en forma controlada, por medio de la varilla pararrayos, un conductor bajante y un electrodo de tierra separado. Es esencial conectar el sistema electrodo de tierra del sistema de protección contra rayos con el electrodo de tierra del edificio o estructura. Si los sistemas no están conectados en el momento que se produzca una descarga eléctrica, se producirá arcos eléctricos o chispas entre ellos lo cual es perjudicial para la seguridad de las

personas. La figura 2 muestra la forma correcta de conectar estos dos sistemas.

Figura 2. Tierra de protección contra rayos

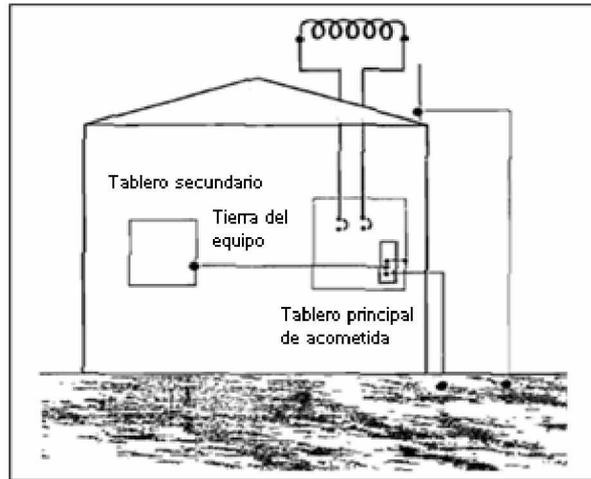


Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.2.3 Sistema de tierra de equipo o tierra de seguridad.

Está destinado a la protección del personal y el equipo contra fallas o cortocircuitos. Este sistema conecta todas las partes metálicas de los equipos, es decir, los gabinetes metálicos, los conductores metálicos, las cubiertas metálicas de enceres domésticos eléctricos, y todo el equipo que puede ser energizado y entrar en contacto con personas, para mantener una misma referencia a tierra. Ver figura 3.

Figura 3. Tierra del equipo o tierra de seguridad



Fuente: Soluciones Prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

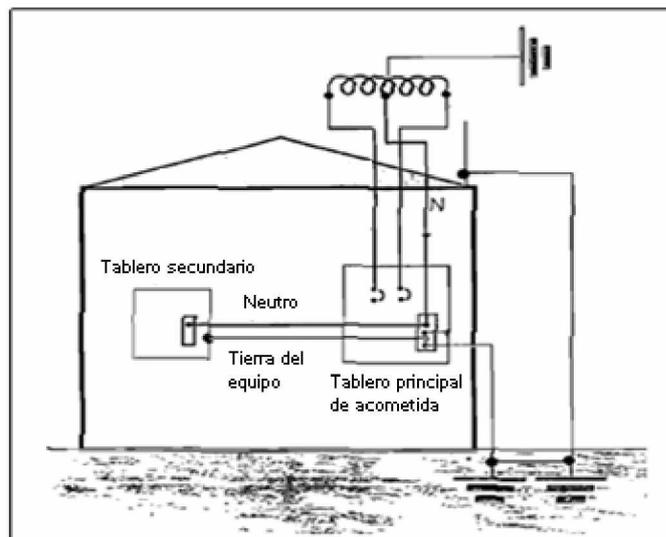
Este método no utiliza el sistema bajo tierra o electrodo de tierra. Las conexiones deben ser efectivas, es decir, deben tener continuidad para poder transportar la corriente de falla con seguridad, y que ofrezca una baja impedancia, de tal forma que facilite la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas.

1.2.4 Sistema conductor conectado a tierra o conductor neutro.

Tiene la función de transportar corriente de retorno del conductor de fase para un sistema monofásico y el retorno de las corrientes de fase que no se cancelaron, para un sistema trifásico y un sistema monofásico de fase dividida o sistema monofásico de tres hilos.

El conductor conectado a tierra es la referencia a tierra del sistema debido a que, en un sistema conectado a tierra, se conecta a tierra el transformador de la empresa suministradora de energía y este conductor conectado a tierra se trae a nuestro equipo de servicio a la entrada del edificio o estructura. En este punto se establece la unión neutro-tierra, en la barra de tierra al conductor neutro. Ver figura 4.

Figura 4. Conductor conectado a tierra o conductor neutro

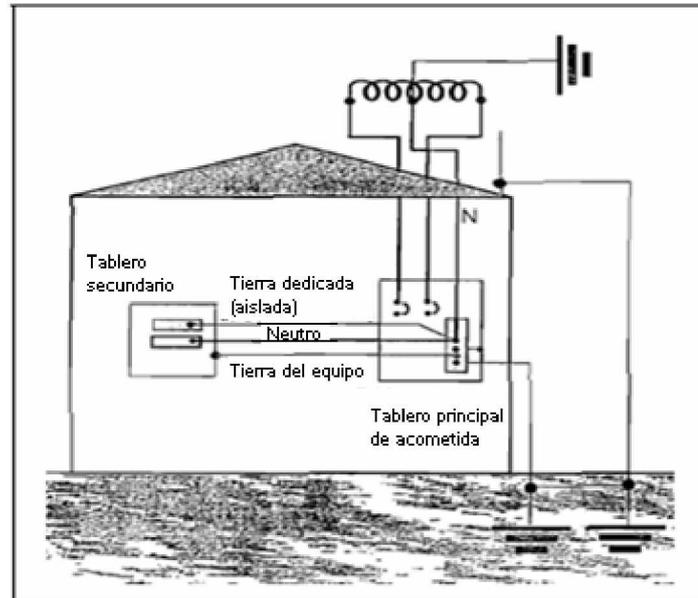


Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.2.5 Sistema tierra aislada.

Ofrece una tierra libre de ruido eléctrico para equipo electrónico sensible, y se usa especialmente en salas de computadoras. También se conoce como tierra dedicada. Este término surgió de la necesidad de implementar un sistema libre de ruido, separado de la tierra sucia (tierra ya existente) en el edificio o estructura. La figura 5 ilustra la tierra aislada.

Figura 5. Tierra aislada o delicada



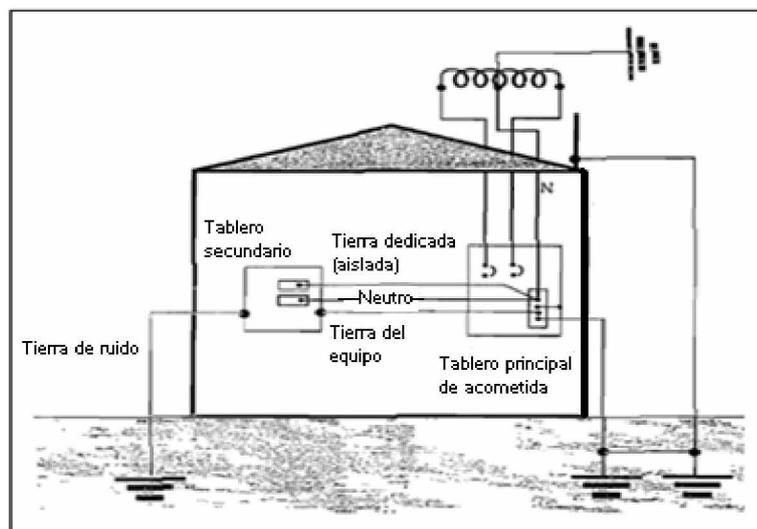
Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.2.6 Sistema tierra de referencia de señal.

Es el sistema de referencia cero para todos los equipos de señales digitales. Este es un sistema inventado por fabricantes de equipo electrónicos con objeto de proporcionar una tierra sin contaminación, separada de la tierra del equipo, ver figura 6, las conexiones tienen que estar conectadas entre el electrodo de tierra y el sistema de tierra del edificio. A esta tierra se le han designado una gran cantidad de nombre, tales como tierra de señal, tierra de ruido, tierra electrónica, pero aunque sean buenas las interpretaciones para proteger el equipo, se debe tener muy en cuenta la interconexión de los sistemas.

Un cable AWG número 12 tiene aproximadamente 0.10 ohmios de resistencia, por lo tanto solo se requiere 0.10 voltios para generar 1 amperio. Cualquier intensidad de corriente en el conductor de tierra afecta a los equipos electrónicos, ya que esta tierra es la referencia cero para el equipo electrónico digital.

Figura 6. Tierra de señal



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

Al diseñar y analizar cualquier sistema eléctrico o electrónico de conexión a tierra, las consideraciones más importantes son:

1. Cumplir con las prácticas de conexión o puestas a tierra que rige el código eléctrico internacional.
2. Cualquier circuito que alimente una corriente a un conductor debe proveer una trayectoria de retorno al punto de origen.
3. Las corrientes siempre siguen la trayectoria de mínima impedancia.

4. Las corrientes producidas en sistemas digitales modernos fluctúan entre el espectro de frecuencia de corriente continua y las radiaciones electromagnéticas de la luz visible.

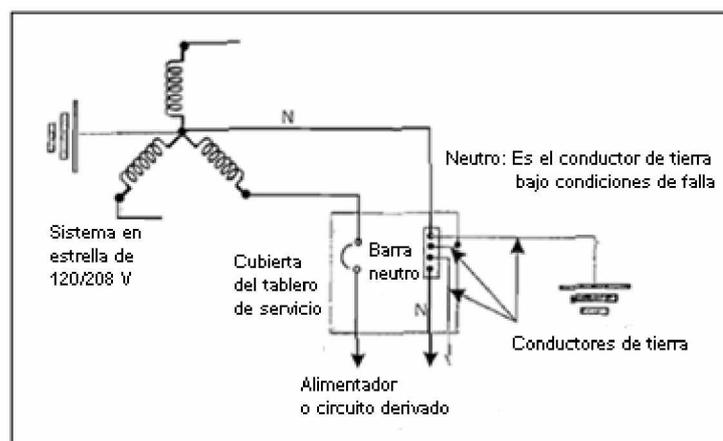
Siempre se debe tomar en cuenta la seguridad del personal, la protección del equipo y el buen funcionamiento del equipo en general.

1.3 Conexión efectiva a tierra.

La figura 7 ilustra los puntos que es preciso considerar para obtener una puesta a tierra efectiva a tierra. La trayectoria a tierra requiere la instalación de tres elementos los cuales son:

1. Los circuitos.
2. El equipo.
3. Las cubiertas conductoras de equipos.

Figura 7. Conductor de tierra



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

La trayectoria debe ser:

1. Conectada a tierra intencionalmente.
2. Permanentemente.
3. Continua.
4. Segura
5. Una trayectoria de baja impedancia.

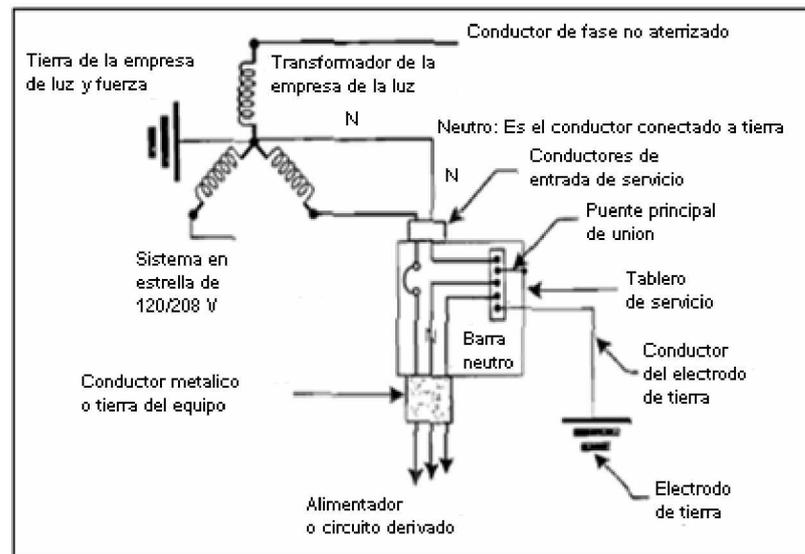
Si la trayectoria es segura, implica que el calibre de los conductores deber ser adecuado para que conduzcan sin riesgos cualquier corriente de falla. Además, la impedancia debe mantenerse a un valor bajo debido a tres razones:

1. Limitar el voltaje a tierra.
2. Facilitar la operación de los dispositivos de protección.
3. Drenar a tierra las corrientes indeseables que generan ruidos, lo mismo que corrientes estáticas y de fuga.

Es muy importante mantener una tierra efectiva para las tres diferentes instalaciones: circuitos, equipo y cubiertas metálicas, la trayectoria a tierra se integra en el circuito eléctrico cuando éste se instala.

La figura 8 resume todos los términos usados en la entrada de servicio o acometida, también muestra un conducto metálico usado como conductor de tierra del equipo. El conductor de tierra no está diseñado para transportar corriente de carga, bajo condiciones normales, solo bajo condiciones de falla. Debido a que las conexiones mecánicas del conducto metálico pueden aflojarse y provocar un aumento en la impedancia, se deben utilizar alambres de cobre para la tierra de seguridad.

Figura 8. Identificación de términos usados en la entrada de la acometida



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.4 Elementos que intervienen en la puesta a tierra.

- Electrodo.
- Electrodo en concreto
- Electrodo para pararrayos.
- Conductor del electrodo
- Conectores y accesorios.

1.4.1 Electrodo de puesta a tierra.

El término electrodo se utiliza para identificar a las terminales de una batería, las cuales indican la trayectoria para la circulación de los electrones dentro y fuera de la batería. El electrodo de tierra de una instalación eléctrica

es el medio por el cual los electrones entran a tierra. Por tanto, es la instalación de una terminal para facilitar la entrada de electrones a tierra.

La conexión a tierra, como se indicó antes, es un término que frecuentemente se malinterpreta. La confusión se debe al hecho que no se definen adecuadamente los términos, a un mal entendimiento de los conceptos básicos y a la falta de conceptos nuevos para los modernos sistemas digitales electrónicos. El resultado es que muchas de las prácticas de conexión a tierra se basan en opiniones sin fundamento.

Las prácticas de conexión a tierra que ofrecen excelente desempeño en bajas frecuencias de alimentación de 50, 60, y 400 Hertz, no son adecuadas para controlar correctamente las altas frecuencias presentes en los modernos sistemas de datos. Debido al advenimiento de las fibras ópticas, las frecuencias de datos que fluctúan prácticamente entre la corriente continua y la radiación electromagnética de la luz visible.

El objetivo primario del SPT es el control de corrientes indeseables, corrientes de falla, corrientes que generan las descargas electrostáticas, corrientes de ruido de alta frecuencia y corrientes de fuga. Concluyendo, el electrodo de puesta a tierra es un conductor en íntimo contacto con el suelo, el cual proporcionar una conexión eléctrica con el terreno. Puede ser una varilla, tubo, placa, cinta, o cable.

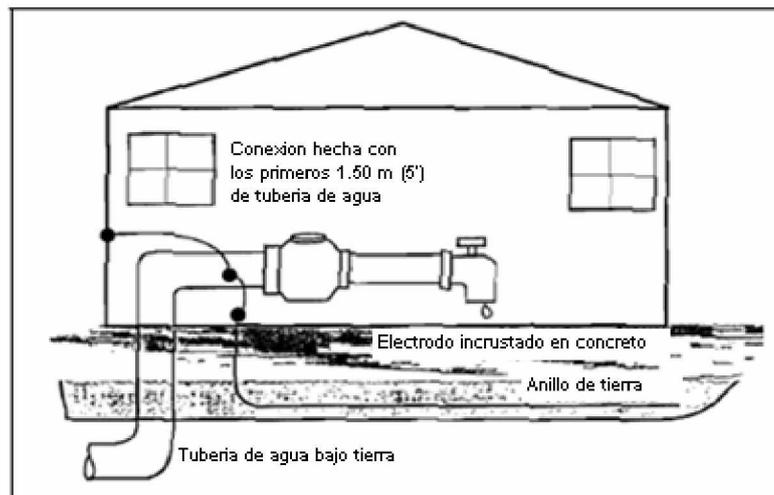
1.4.2 Componentes del sistema electrodo de tierra.

Los diferentes electrodos de tierra permitidos en una estructura o edificio, deben unirse conjuntamente para formar el sistema electrodo de tierra, el cual puede consistir en:

- Tubería metálica de agua, instalada bajo tierra, con continuidad eléctrica, en contacto directo con la tierra en una longitud mínima de 3.05 metros (10 pies)

En caso de que un medidor y otro herraje comprometan la continuidad se puede hacer eléctricamente continua uniendo las secciones de la tubería con un puente de unión; de este modo, efectúa la conexión al conductor del electrodo de tierra. En la figura 9, se ilustra la conexión a tierra por medio de una tubería metálica.

Figura 9. Tubería metálica de agua como electrodo de tierra

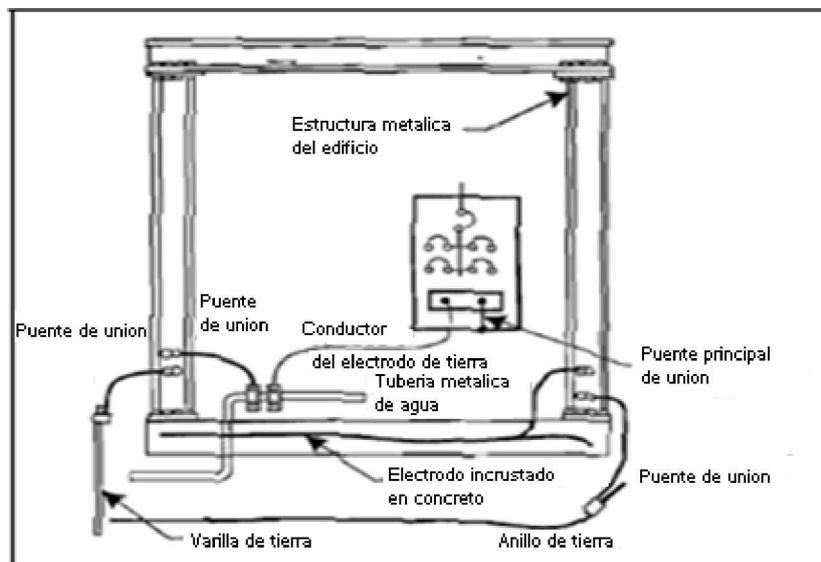


Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

- Estructura metálica de edificio. La estructura o armazón metálica del edificio puede utilizarse como electrodo de tierra cuando se conecta a tierra en forma efectiva.

Usualmente si la estructura metálica tiene un contacto directo con la tierra en un suelo homogéneo, se considera conectado a tierra en forma efectiva. Sin embargo hay que tener en cuenta, que para evitar los cambios de clima, los cimientos de la construcción o edificio se encuentran sobre capas de arena y materiales plásticos usados como barreras de vapor, por lo tanto, ya que la arena y los plásticos son materiales no conductores, la estructura del edificio no estaría conectada a tierra en forma efectiva. La mejor opción es medir la resistencia a tierra de este electrodo. Ver figura 10.

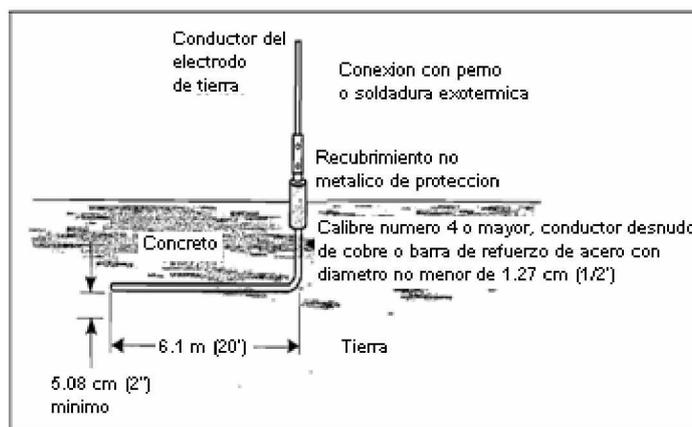
Figura 10. Estructura metálica de un edificio como electrodo de tierra



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

- Electrodo incrustado en concreto. Este electrodo consiste en una o más varillas de una longitud mínima de 6 metros (20 pies) en contacto directo con la tierra, y cubierto de 5.8 cm (2 pulgadas) de concreto. Usualmente se ubica dentro y cerca de la parte inferior de los cimientos o bases que estén en contacto directo con la tierra. Ver figura 11.

Figura 11. Electrodo incrustado en concreto (tierra Ufer)



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

La unión entre el acero y el concreto al conectarse las varillas en la puesta a tierra, produce una pequeña rectificación de corriente alterna (aproximadamente 0.01%) de la red de tierras, lo que produce corrosión galvánica, y un aumento de volumen en la superficie de la varilla, éste aumento tiende a expandir la varilla y a romper el concreto donde está inmerso el electrodo.

Este sistema también es conocido como tierra Ufer, y consiste en que los electrodos consistentes en 5.8cm de varilla de refuerzo

enterradas en los cimientos de concreto de los edificios miden resistencia de 5 o menos ohmios aún en suelos secos y arenosos.

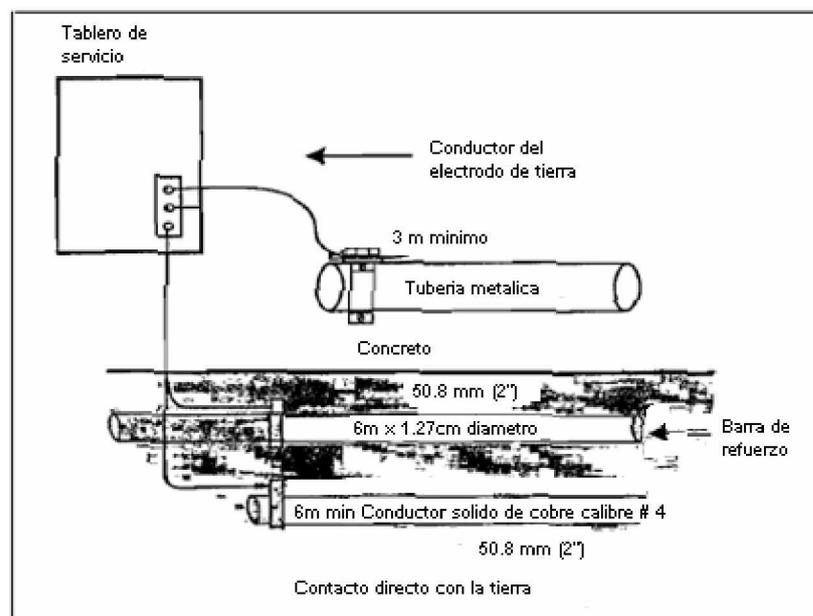
Se debe tener en cuenta que el concreto puede dañarse por efectos de corrosión de la varilla o corrientes de falla altas. El acero corroído puede expandirse más de dos veces de su volumen original y una corriente de falla alta es capaz de convertir la humedad presente en el concreto, en vapor de alta presión, el cual puede provocar fisuras en el concreto.

El electrodo Ufer se utiliza a menudo en sitios remotos de telecomunicaciones, cuando el suelo es rocoso y es difícil la utilización de otros esquemas de conexión a tierra. A menudo también se utiliza en sistemas radiales, el cual también es muy efectivo, las ventajas que ofrece el electrodo Ufer son:

1. El concreto en contacto directo con la tierra tiende a retener la humedad.
2. Las varillas de refuerzo ofrecen más de una trayectoria para el flujo de electrones.
3. Si existe un edificio o estructura sobre el concreto, este ofrece una presión constante en el punto de conexión, entre el concreto y la tierra.
4. El concreto proporciona una superficie amplia de contacto con la tierra.
5. Muchas pruebas realizadas con la tierra Ufer, han demostrado que es un electrodo de tierra efectivo y confiable.

La figura 12 muestra un electrodo de tierra que usa una tubería y un electrodo incrustado en concreto.

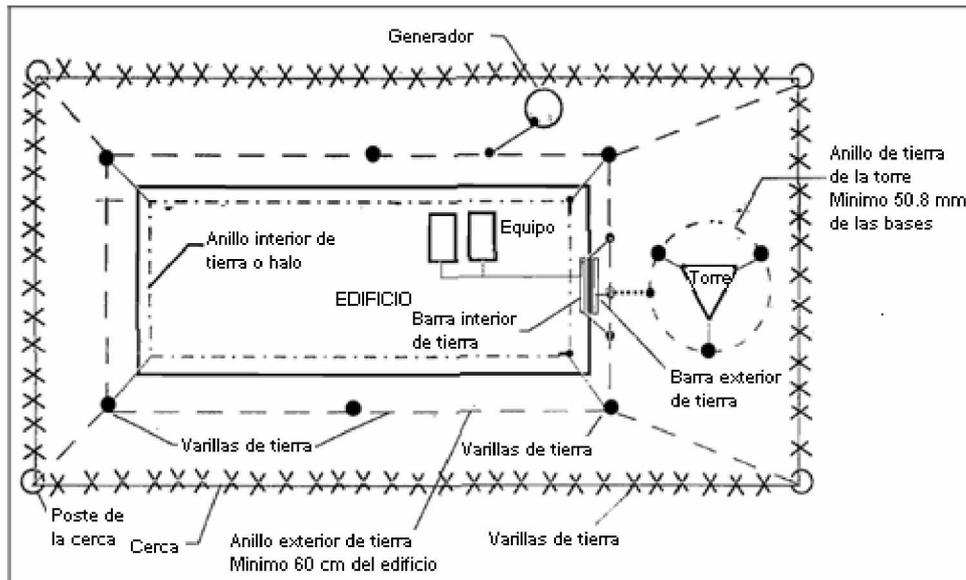
Figura 12. Electrodo de tierra que usa una tubería y un electrodo incrustado en concreto



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

- Anillo de tierra. Consiste en un cable de cobre desnudo colocado alrededor del edificio o estructura de una longitud mínima de 6.1 metros (20 pies) y de tamaño no menor que calibre AWG número dos, como se muestra en la figura 13. Este calibre debe estar en contacto directo con la tierra a una profundidad no menor de 76.2 cm (2.5 pies).

Figura 13. Anillo de tierra



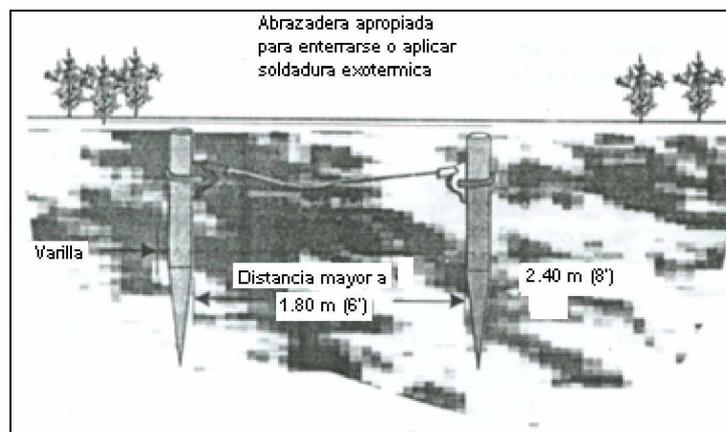
Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

- Sistemas metálicos subterráneos. Son las estructuras enterradas como sistemas de tubería o tanques bajo tierra. Las tuberías metálicas subterráneas de gas, no deben usarse como electrodos de tierra.
- Electrodo de tubos y varillas. Estos requieren tener longitudes no menores de 1.8 metros (6 pies) de largo y una longitud de contacto mínimo con la tierra de 2.40 metros (8 pies) por debajo de la línea de congelamiento, ver figura 14.

Los electrodos de tuberías o de concreto no serán menores de 19 milímetros (3/4 de pulgada) tamaño comercial, y donde sean de hierro o acero tendrán la superficie externa galvanizada o con cubierta de metal para protección contra la corrosión. El aluminio no está permitido para

usarse en electrodos de tierra. Los electrodos de varillas de acero o hierro tendrán un diámetro mínimo de 1.59 cm (5/8 de pulgada). Las varillas de acero inoxidable y varillas de material no ferroso menores de 5 cm (1/6 de pulgada) de diámetro se pueden usar solo si se encuentran certificadas para el fin.

Figura 14. Varillas de tierra



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

- Electrodo de placa metálica. Pueden usarse como electrodos de tierra si exponen no menos de 0.186 metros cuadrados (2 pies cuadrados) de superficie al terreno exterior. Los electrodos de placa de hierro o acero, deben tener un espesor mínimo de 6.35 mm (1/4 de pulgada). Los electrodos hechos de metales no ferrosos tendrán un espesor mínimo de 1.52 mm (0.06 de pulgada). Las medidas mínimas de la placa son de 30.5 cm por 30.5 cm por cada lado.

Todas las tuberías, conductos metálicos de aire y cualquier elemento metálico, dentro o sobre el edificio o estructura, deben conectarse a

tierra. El conductor del electrodo de tierra, debe conectar el sistema de electrodo de tierra a la barra común o neutro.

La conexión al sistema electrodo de tierra debe efectuarse con un proceso exógeno, soldaduras que se funden a altas temperaturas, soldaduras exotérmicas, o soldaduras con aleación no ferrosa a base de calor. También puede usarse una abrazadera de terminal de tipo bloque, perno o una conexión de compresión irreversible. No se permite el uso de sujeciones mecánicas, porque pueden aflojarse con el tiempo, por los efectos de congelación y descongelación del suelo.

En lugares donde dos o más edificios o estructuras son alimentados por un servicio de acometida común, el sistema de conexión a tierra en cada edificio o estructura tendrá un electrodo de tierra. Este debe estar conectado al tablero de metal del interruptor general de desconexión del edificio, así como al conductor de circuito conectado o puesto a tierra del sistema de CA en el lado de alimentación del interruptor de desconexión del edificio o estructura.

- Electrodo artificial construido para Sistemas de Puesta a Tierra. Este tipo de electrodos se utiliza en casos especiales o en puntos importantes por ejemplo:
 1. Cuando no hay disponibles electrodos tales como tuberías metálicas de agua, estructuras metálicas del edificio, electrodo incrustado en concreto o un anillo de tierra, pueden utilizarse electrodos artificiales.
 2. Para obtener mejores resultados, los electrodos artificiales deben instalarse por debajo del nivel permanente de humedad.
 3. Los electrodos artificiales no deben recubrirse de pintura, esmalte u otros revestimientos no conductores. Esta disposición tiene como fin que haya un buen contacto entre el electrodo y la tierra. Por tanto, la grasa, pintura y esmalte se consideran aislantes.

4. Los electrodos de tierra deben estar separados al menos 1.8 metros (6 pies). Cuando la resistencia sea mayor de 25 ohmios y se limita a dos el número máximo de electrodos requeridos. Esto se aplica solamente a varillas, tubos o electrodos de placa.

Cuando se instala el segundo electrodo se unen ambos y se considera como un solo electrodo de tierra, la eficiencia de los electrodos mejora si los electrodos se separan a mayores distancias. (1.8 metros). Esta separación ayuda a que las capas concéntricas alrededor de los electrodos no se sobrepongan entre si. Esta regla también se aplica para electrodos de tierra del sistema de protección contra rayos.

- Electrodo como barra electrolítica. La barra electrolítica es una variación del electrodo de tierra de varilla. Sobre todo, se usa primariamente en instalaciones donde existen equipos que tienen componentes electrónicos sensibles y se requiere una baja resistencia a tierra, o donde existen malas condiciones de suelo y es difícil obtener una baja resistencia de terreno. Cuando se instala correctamente, este electrodo de tubo produce un electrolito con buena conductividad, la cual penetra el suelo alrededor de la barra y aumenta la conductividad de la tierra a su alrededor.

Para obtener la resistencia que se requiere puede ser necesario una barra electrolítica mayor de 2.40 metros (8 pies) y cierto número de barras electrolíticas. Ver figura 15.

La barra electrolítica consiste en un tubo compuesto por 95% de cobre y 5% de níquel, de 2.40 metros (8 pies) de longitud o mayor, y aproximadamente 5 cm (2 pulgadas) de diámetro, y llena de una mezcla de sales: $CaCO_3$ y $NaCl$, que absorben la humedad.

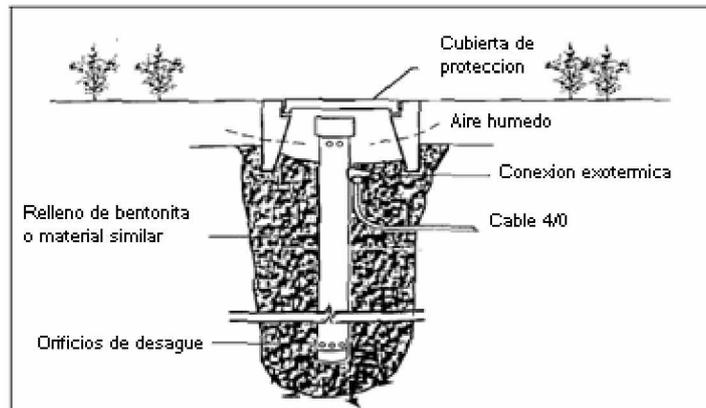
El tubo tiene tapones de cobre por ambos extremos y cuenta con dos orificios a 5 cm (2 pulgadas) de la parte inferior, por los cuales los

electrolitos se distribuyen en la tierra. El electrodo se instala en un hueco perforado en la tierra, que debe tener un mínimo de 15 cm (6 pulgadas) de diámetro y rebasar por 15 cm (6 pulgadas) la longitud del electrodo. El electrodo se ubica en el centro del hueco con 15 cm (6 pulgadas) de la parte superior del electrodo por debajo de la superficie. El hueco alrededor del electrodo se rellena con bentonita (arcilla cuya virtud principal radica en absorber y retener agua), la cual se mezcla con agua. La bentonita es un material volcánico de alta conductividad. En la parte superior se deja un espacio sin obstrucción para la conexión del conductor del electrodo de tierra y permite que los agujeros no se obstruyan.

El modo de operación de la barra electrolítica se basa en la capacidad del cloruro de calcio para condensar la humedad del aire a través de los dos agujeros de la parte superior. Debido a la fuerza de gravedad el agua pasa a través de la sal dentro del tubo y se convierte en electrolito, el cual es un buen conductor de electrones. Existe un pequeño comportamiento en la parte inferior del tubo donde se almacena agua y se desborda dentro del hueco lleno de bentonita. El agua se convierte en iones de sal metálicos y en contacto con la tierra aumenta la conductividad de esta. También aumenta la conductividad de la bentonita, la cual tiene la propiedad de adherirse a la superficie exterior del tubo, lo mismo que a la superficie del hueco.

No importa que tan seco sea el ambiente, la bentonita se adhiere al terreno. Esto elimina la resistencia entre el electrodo y la tierra. El resultado total es el descenso de la resistencia de las capas de tierra alrededor del electrodo. No es preciso reemplazar la sal contenida en el tubo, ya que no se disipa con el tiempo y su vida útil se estima en 25 años.

Figura 15. Electrodo como barra electrolítica



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.4.3 Funciones del electrodo de tierra.

El sistema electrodo de tierra puede consistir en uno o más electrodos que tienen funciones específicas como partes del sistema. Las funciones del electrodo de tierra son:

1. Mantener un buen contacto con la tierra, de tal forma que las partes metálicas de la instalación eléctrica, que no conducen corriente, y que se conectan al sistema de tierra, se mantenga al potencial de tierra o potencial cero.
2. Proporcionar muchas trayectorias a tierra para la gran cantidad de electrones generados por una descarga atmosférica o un sobrevoltaje transitorio, de tal forma que sean disipadas en forma instantánea.
3. Drenar las corrientes de fuga a tierra, lo mismo que las descargas electrostáticas, las cuales pueden generarse o acumularse en las cubiertas metálicas de los equipos.

Erróneamente se asigna al electrodo de tierra, transportar corriente de falla con el fin de facilitar la operación de los dispositivos de protección. Esto no es una función del electrodo de tierra. La razón por la cual no se usa el electrodo de tierra como trayectoria de la corriente de falla, es la alta impedancia del terreno, la cual no permitiría corrientes suficientes para activar el dispositivo de protección, o interruptor de circuito.

La función primordial del electrodo de tierra es mantener la tierra y todas las cubiertas o partes metálicas del equipo eléctrico que no transportan corriente, a una referencia cero. Esto puede realizarse por medio de un sistema efectivo a tierra, lo cual significa una atención especial para mantener la continuidad del conductor de la tierra del equipo. La unión de todos los electrodos de tierra es importante a fin de mantener el potencial cero. El electrodo de tierra ofrece multitud de trayectorias para los electrones, pero las trayectorias de baja impedancia dependen de la composición del suelo.

Al diseñar una instalación, es importante analizar el tipo de suelo desde el punto de vista de puesta a tierra. La conductividad de la tierra varía con la composición de ésta, por lo tanto, un suelo arenoso no tiene tanta conductividad como un suelo fértil. Adicionalmente, mientras más alto sea el contenido de humedad, mejor será su conductividad.

El sistema electrodo de tierra, o tierra física, puede ser considerado como un sistema de conductores que proporcionan una trayectoria controlada, para dirigir electrones hacia la tierra. Estos electrones pueden provenir de electricidad estática, corrientes de fuga o descargas atmosféricas.

1.4.4 Varilla de tierra.

La varilla de tierra debe tener una longitud de 2.44 metros (8 pies), un diámetro de 13 mm (1/2 pulgada) como medidas mínimas. Esto proporciona aproximadamente 312 cm cuadrados (150 pulgadas cuadradas) de superficie en contacto directo con la tierra. Se ha probado que un incremento en la longitud de la varilla tiene un impacto más favorable en la resistencia de la tierra que un aumento en su diámetro. Entre más larga sea la varilla menor será la resistencia a tierra. En la figura 16 se ilustra la teoría de la varilla de tierra y su resistencia que la rodea. Existen tres resistencias que considerar:

1. La de la varilla misma.
2. La del contacto entre la varilla y la tierra.
3. La de la tierra que rodea la varilla.

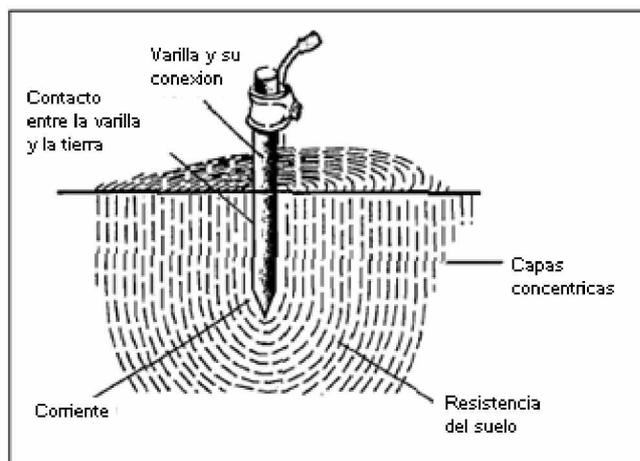
La resistencia del material conductor que forma la varilla usualmente tiene un valor muy pequeño y es despreciable. Cuando la varilla de tierra se mantiene libre de grasa, pintura u otro material no conductor la tierra se comporta firmemente contra la varilla, la resistencia de contacto también es muy baja y se considera despreciable.

La resistencia de la tierra se puede visualizar como un varilla de tierra con capas concéntricas de tierra a su alrededor. En la figura 16 se muestra una varilla de tierra con capas concéntricas; la capa mas cercana a la varilla tiene menor superficie y por lo tanto presenta una mayor resistencia. Al crecer el área de cada capa se incrementa el área alrededor de la varilla y existirá un gran número de trayectorias para el flujo de electrones. Esta situación puede compararse a un conductor. Entre más grande sea la sección transversal del conductor más baja será su resistencia.

Debido a las capas concéntricas alrededor del electrodo se explica por qué un electrodo de mayor longitud puede dispersar mejor los electrones en la tierra que uno de menor longitud.

Cuando el electrodo de tierra no hace un buen contacto con la tierra, esta unión se calienta como cualquier otra unión de gran resistencia. En áreas donde el suelo tiene una composición arenosa, el calor generado por los electrones tratando de entrar a la tierra es tal que se ha registrado que la temperatura ha cristalizado la arena. Aunque existan numerosas trayectorias para los electrones, la mayoría de estos entran por la parte inferior del electrodo. Los altos voltajes y especialmente la energía de un rayo viajarán en línea recta.

Figura 16. Varilla de tierra y resistencia del electrodo de tierra



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.4.5 Técnicas de conexión a tierra para el sistema electrodo de tierra.

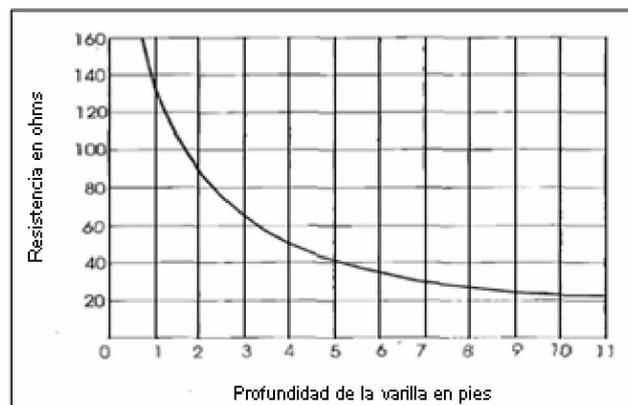
En lugares donde la medición de la resistencia del suelo es mayor que 1 ohmio, 5 o 25 ohms, es preciso emplear ciertas técnicas para disminuirla. Si se duplica el diámetro del electrodo de tierra la impedancia disminuye solo el 10% aproximadamente, mientras que si se duplica la longitud de la varilla a tierra la impedancia disminuye hasta 40%.

Cuando la resistividad del suelo no es lo suficientemente baja, pueden utilizarse varios métodos para mejorarla.

1. El aumento de la longitud del electrodo de tierra.
2. la utilización de varias varillas.
3. El tratamiento del suelo.

La figura 17 muestra como varía la resistencia de la tierra cuando aumenta o disminuye la profundidad del electrodo.

Figura 17. Gráfica de la resistencia de la tierra y la disminución con la profundidad del electrodo

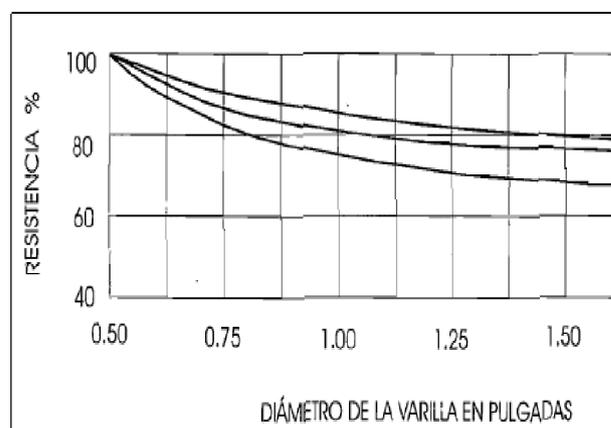


Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

La figura 18 demuestra que el diámetro de la varilla no tiene un gran efecto en la reducción de la resistencia de tierra. Esta es la razón por la cual la separación mínima entre electrodos es 1.8 metros (6 pies). Si estas se encuentran a una distancia menor entre si, las capas concéntricas de cada varilla estarían superpuestas entre si formando un electrodo de gran tamaño y de mayor diámetro, lo cual no es efectivo.

La resistencia de los electrodos artificiales debe ser igual o inferior a 25 ohms. Para la instalación de equipos construidos de microprocesadores, computación, telecomunicaciones, medios electrónicos, etcétera, la resistencia de cualquiera de los sistemas de electrodos debe ser igual o inferior a 5 ohms.

Figura 18. Gráfica del efecto del diámetro de la varilla en la resistencia de tierra



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.5 Conductor del electrodo de puesta a tierra.

Conductor que es intencionalmente conectado a una puesta a tierra, sólidamente para distribuir la tierra a diferentes sitios de una instalación.

El conductor del electrodo de tierra se conecta: al conductor de la tierra del equipo o tierra de seguridad; al conductor conectado a tierra cuando se usa un sistema conectado a tierra; y a ambos cuando están presentes.

También se conecta al tablero de servicio, en la fuente de un sistema derivado separadamente, o al primer dispositivo de desconexión.

El conductor del electrodo de tierra completa tres trayectorias con el electrodo de tierra, estas son:

1. La trayectoria desde el conductor conectado a tierra.
2. La trayectoria desde el conductor de tierra del equipo cuando se usa un alambre como conductor de tierra del equipo.
3. La trayectoria desde el puente principal de unión cuando se usan conductos metálicos como conductores de tierra del equipo.

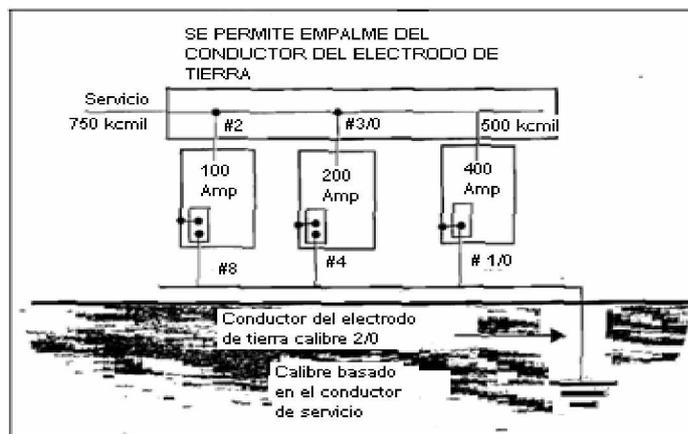
El conductor del electrodo de tierra puede ser de cobre, aluminio y aluminio revestido de cobre. Los materiales usados deben resistir condiciones corrosivas o estar protegidos contra corrosión, puede ser sólidos o multifilar, puede estar aislado, recubierto o desnudo, debe tener continuidad y no tener empalmes.

En casos especiales si se puede realizar empalmes, por ejemplo cuando se usa una barra común como electrodo de tierra. La figura 19 ilustra la excepción en el uso de empalmes del conductor de tierra, se debe tomar en cuenta cuatro puntos claves los cuales son:

1. La dimensión del conductor del electrodo de tierra se establece de acuerdo con el diámetro de los conductores de la acometida.
2. La extensión de las derivaciones del conductor del electrodo de tierra depende de la longitud de las derivaciones del alimentador de servicio o acometida.
3. La derivación debe colocarse dentro de la cubierta y no conectarse fuera de esta.
4. Las derivaciones deben efectuarse de tal forma que el conductor del electrodo de tierra permanezca sin empalmes.

La figura 19 muestra la conexión del conductor del electrodo de tierra cuando existe más de un interruptor de servicio. Se permite empalmar el conductor del electrodo de tierra mediante el uso de una soldadura exotérmica o conectores de compresión irreversible fabricados para ese propósito.

Figura 19. Empalme del conductor del electrodo de tierra cuando existe más de un interruptor de servicio



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.5.1 Instalación y protección del conductor de tierra.

La instalación y protección del conductor del electrodo de tierra requiere tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Si el conductor del electrodo de tierra se instala sin un conducto o cubierta, debe estar asegurado firmemente a la superficie en la cual se extiende.
2. La cubierta que protege al conductor del electrodo de tierra debe asegurarse firmemente a la superficie por donde se extiende.
3. Un conductor de cobre o aluminio calibre 4/0 o mayor debe protegerse si se encuentra expuesto a daño físico.
4. Se permite que el conductor de un electrodo de tierra calibre número 6, sin protección metálica, y que no este expuesto a daño físico, se extienda a lo largo de la superficie del edificio o estructura solo si se encuentra asegurado firmemente a esta superficie.
5. Entre las tuberías permitidas para proteger el conductor del electrodo de tierra se encuentran:
 - Conduit metálico rígido (RMC)
 - Conduit metálico intermedio (IMC)
 - Conduit no metálico rígido (PVC)
 - Tubo metálico eléctrico (EMT)
 - Cable acorazado
6. Cualquier conductor de electrodo de tierra cuyo calibre sea menor del número 6 AWG debe estar protegido.

1.5.2 Calibración del conductor del electrodo de tierra.

Para seleccionar los tamaños mínimos permisibles del conductor del electrodo de tierra, se toman en cuenta dos criterios:

1. Tamaño del conductor de la acometida del edificio o inmueble, si existen más de dos acometidas, se debe seleccionar la de mayor calibre.
2. Tipo del electrodo de tierra.

La tabla I sirve para seleccionar el conductor del electrodo, si el electrodo de tierra consiste en un electrodo incrustado en concreto, una varilla enterrada, un anillo de tierra u otro electrodo fabricado y descrito anteriormente.

En el caso de un electrodo artificial o fabricado, no se requiere que el conductor sea superior que un AWG número 6 de cobre y si esta incrustado en concreto, no se requiere que el calibre del conductor de cobre sea superior a AWG número 4. Así mismo, si se conecta a un anillo de tierra, no es necesario que el calibre del conductor sea mayor que el calibre usado para el anillo.

Tabla I. Tabla para seleccionar el calibre del conductor del electrodo de tierra

Tabla para seleccionar el calibre del conductor del electrodo de tierra Sistema de alimentación de corriente alterna							
Área del conductor de mayor calibre o calibre equivalente para conductores en paralelo				Calibre del conductor del electrodo de tierra			
Cobre		Al o Al recubierto		Cobre		Al o Al recubierto de cobre	
Métrico mm ²	Ingles AWG kcmil	Métrico mm ²	Ingles AWG kcmil	Métrico mm ²	Ingles AWG kcmil	Métrico mm ²	Ingles AWG kcmil
Hasta 32.68	2 o menor	Hasta 53.48	1/0 o menor	8.367	8	13.30	6
Mas de 32.62 Hasta 53.48	1 o 1/0	Mas de 53.48 Hasta 85.01	2/0 o 3/0	13.3	6	21.15	4
Mas de 53.48 Hasta 85.01	2/0 – 3/0	Mas de 85.01 Hasta 126.7	4/0 o 250	21.15	4	33.62	2
Mas de 85.01 Hasta 177.3	Mayor de 3 Hasta 350	Mas de 126.7 Hasta 253.7	Mayor de 250 a 500	33.62	2	53.48	1/0
Mas de 117.3 Hasta 304.0	Mayor de 350 Hasta 600	Mas de 253.4 Hasta 456.0	Mayor de 500 a 900	53.48	1/0	85.01	3/0
Mas de 304.0 Hasta 557.4	Mayor de 600 Hasta 1000	Mas de 456.0 Hasta 886.5	Mayor de 900-1750	67.43	2/0	107.2	4/0
Mas de 557.4	Mayor de 1100	Mas de 886.5	Mayor de 1750	85.01	3/0	126.7	250

Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.5.3 Selección del conductor del electrodo de tierra de CD.

Existen tres formas de seleccionar correctamente el conductor del electrodo de tierra.

1. Utilizando un estabilizador de tres hilos que tenga protección de sobre corriente en caso de que se presente una condición de cargas no balanceadas. El diámetro del conductor del electrodo de tierra no debe ser menor que el diámetro del conductor neutro.
2. Empleando sistema de cd diferentes del estabilizador de 3 hilos. El área circular del conductor del electrodo de tierra no debe ser menor que el área circular del conductor de mayor calibre.
3. En ningún caso el calibre del conductor de tierra debe ser menor que el número 8 AWG de aluminio.

1.5.4 Selección del conductor del electrodo de tierra de CA.

El calibre del conductor del electrodo de tierra de un sistema no debe ser menor que el calibre que se indica en la tabla I. Existen tres reglas que permiten calibrar el conductor del electrodo de tierra sin usar la tabla I, cada una de ellas tiene tres partes y se aplica a un electrodo de tierra específico.

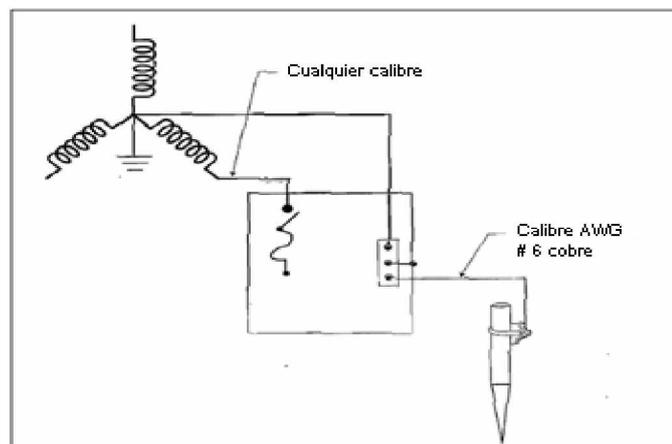
La primera regla se aplica a los electrodos de varillas, tuberías o placas; la segunda regla se aplica a electrodos encajados en concreto y la tercera a anillos de tierra. La primera enumera los requisitos siguientes:

1. Se aplica a electrodos artificiales, como varillas, tubos o electrodos de placa.
2. Requiere una sola conexión entre el electrodo de tierra y el conductor conectado a tierra del sistema de tierra.
3. No requiere ser mayor del número 6 de cobre.
4. No requiere ser mayor que el número 4 de aluminio.

Para la segunda regla (ver figura 20) los sistemas conectados a tierra, donde el electrodo de tierra, es un electrodo encerrado en concreto, que solo requieren una conexión entre el electrodo de tierra y el servicio, no requiere que sea mayor que el número 4 de cobre. La tercera regla se aplica a una conexión a un anillo de tierra, cuando el conductor del electrodo de tierra es la única conexión al anillo de tierra; el conductor del electrodo de tierra no requiere ser utilizado como anillo.

Los conductores de los calibres antes mencionados pueden transportar todos los electrones que el electrodo de tierra puede disipar en la tierra durante un tiempo determinado. Cuando se usa un conductor de gran tamaño, el electrodo de tierra carece de la capacidad para permitir el movimiento de electrones, por tanto, es necesario incorporar un electrodo de tierra con mayor extensión.

Figura 20. Calibre del conductor de tierra



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

1.5.5 Conectores y accesorios.

Son elementos que sirven para unir a la red de tierra los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etcétera.

Los tipos de conectores que se utilizan son los siguientes:

- Atornillados.
- A presión.
- Soldados.

1.5.5.1 Conectores atornillados.

Se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formados por dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio, que proporciona alta resistencia mecánica a la corrosión. El bronce es un material no magnético y proporciona una conducción segura para las descargas atmosféricas que ocurren comúnmente.

1.5.5.2 Conectores a presión.

Se forman por una pieza hueca, en cuyos extremos se introducen las dos terminales del cable que se va a empalmar y mediante una prensa especial con dados intercambiables según los calibres de los conductores, se produce la unión al comprimirse el material citado, estas conexiones pueden soportar una temperatura máxima de 350 grados centígrados.

1.5.5.3 Conectores soldados con soldadura exotérmica.

La conexión de los conductores de puesta a tierra y los puentes equipotenciales se hace con soldadura exotérmica, conectores a compresión listados, prensas de unión listadas, u otros medios listados.

1.6 Tipos de soldaduras en las uniones de puestas a tierra.

Uno de los principales problemas de los sistemas de puesta a tierra, es el incremento de resistencia debido a las defectuosas uniones que se dan entre el conductor y las varillas, y entre conductores, es así que el incremento de la resistencia por estas uniones se incrementa en sólo pocos meses (5 ó 6), en un 60% o más debido a las sulfataciones que se produce por el paso de corriente a través de estas uniones.

Debido a estos problemas se ha buscado soluciones, y la solución óptima ha sido las soldaduras exotérmicas con un sin número de beneficios que se describen a continuación.

Para el proceso de unión, de la soldadura exotérmica se utilizan moldes de grafito nuevos. Los moldes y los gramos de la carga de soldadura deben ser apropiados para el tipo de unión a soldar, la conexión del cable de la red de tierra a las estructuras y equipos se hace con conectores de cobre adecuados para conectar el cable de cobre de la red de tierra a los electrodos, barras de conexión a tierra de los tableros y las estructuras metálicas galvanizadas, sin que se presente corrosión galvánica entre los diferentes materiales.

Después de la ignición se produce una reacción exotérmica que resultan en metales fundidos con temperatura superior a $2200^{\circ}C$ ($4000^{\circ}F$) y en consecuencia la liberación de humo localizado. Estos materiales no son explosivos. La temperatura de ignición es superior a $450^{\circ}C$ ($850^{\circ}F$), para el polvo de ignición y de $900^{\circ}C$ ($1650^{\circ}F$) para el polvo de soldadura.

Puesta en marcha la ignición el proceso se completa en torno de 30 segundos. Este tiempo es el necesario para que se complete la reacción y para que el material fundido se solidifique.

1.6.1 Ventajas técnicas de la soldadura.

Este proceso es una soldadura molecular cuyo material utilizado tiene el mismo punto de fusión de cobre.

Estando lista la soldadura la sección transversal de la conexión es dos veces mayor que la de los conductores que están siendo unidos, obteniéndose los siguientes resultados:

1. El material utilizado para la realización de la conexión tiene una durabilidad igual a los otros materiales conectados.
2. Las conexiones no son dañadas cuando aparecen altas irrupciones o picos de corriente. Las experiencias muestran que, circulando corrientes elevadas como las de cortocircuito, el conductor se funde y no la conexión.
3. Las conexiones no se desagregan ni sufren corrosión en la parte de la soldadura, independientemente del ambiente en que se aplican. De la misma manera, no presentan problemas de insuficiencia de superficie de contacto o puntos de concentración de presiones. La conexión exotérmica se transforma en parte integrante del conductor.
4. Las conexiones exotérmicas poseen "ampacidad" (capacidad de conducción de la corriente) igual o superior a aquella de los conductores.
5. Como la reacción se completa en pocos segundos, la cantidad total del calor aplicada a los conductores o superficie es inferior a aquella aplicada en otros métodos de soldadura. Este aspecto es importante, especialmente, en la conexión de conductores aislados o tubos de pared fina.

1.6.2 Utilización y manejo de la soldadura.

El proceso de conexiones exotérmicas se caracteriza por su simplicidad y eficacia, siendo recomendado para la soldadura de cobre, cobre acero y acero acero. No requiere fuente externa de energía, ya que utiliza altas temperaturas resultantes de la reacción de los materiales utilizados. Es ideal para utilizar en el campo porque además de ser un equipo liviano y portátil garantiza una

conexión perfecta, rápida y permanente; dispensando mantenimiento y mano de obra especializada.

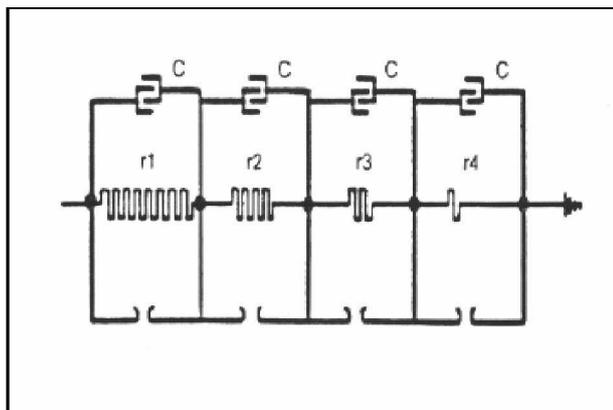
2. SUELO

Sistema natural, resultado de procesos físicos, químicos y biológicos, con componentes principalmente minerales y sólidos inertes que le dan estabilidad, en conjunto con líquidos y gases que definen su comportamiento.

2.1 El suelo como un medio de aterrizaje.

El comportamiento de un electrodo de tierra que se entierra en el suelo se puede analizar por medio del circuito que se muestra en la figura 21. Tal como se muestra en la figura, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de resistencia, r , y como un dieléctrico, excepto para ondas de alta frecuencia y de frente escarpado que penetran el suelo de un material, muy resistivo, la corriente de carga es indiferente en comparación con la corriente de fuga y la tierra se puede representar por una resistencia pura.

Figura 21. Modelo del suelo



Fuente: IEEE, estándar 80-2000.

2.2 Estructura y selección del modelo del suelo.

Es indispensable realizar investigaciones de resistividad en el sitio donde se realizara el SPT, para determinar la composición general del suelo y el grado homogéneo las pruebas de perforación y otras investigaciones geológicas proveen a menudo información importante de la presencia de diferentes capas y la naturaleza del material del suelo, obteniendo algunas ideas del rango de resistividad de la tierra.

2.3 Clasificación de los suelos y rango de resistividad.

Existen un gran número de tablas que muestran los rangos de resistividad para varios tipos de suelos y rocas. Además, existe información mas detallada en libros revistas y publicaciones de ingeniería.

Tabla II. Rangos de resistividad de la tierra

Tipo de tierra	Resistividad promedio ($\Omega.m$)
Suelo orgánico húmedo	10
Suelo húmedo	10^2
Suelo seco	10^3
Roca	10^4

Fuente: IEEE, estándar 80-2000.

2.3.1 Resistividad del suelo.

Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ohm-m) o (Ohm-cm), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica, es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es

la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente, es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas.

La resistividad del suelo varía con la profundidad, el tipo y concentración de sales solubles, el contenido de humedad y la temperatura del suelo. La presencia de agua superficial no necesariamente indica baja resistividad. Dado el impacto de éste parámetro en el valor final de la RPT, es necesario que la resistividad del suelo en el sitio donde será ubicado el sistema de puesta a tierra, sea medida en forma precisa.

2.3.2 Valores recomendados de resistencia de puesta a tierra.

Un buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas; sin embargo, la limitación de las tensiones transferidas principalmente en subestaciones de media y alta tensión es igualmente importante. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse los siguientes valores máximos de RPT adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050, NTC 4552

Tabla III. Valores máximos de resistencia de puestas a tierra

Aplicación	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra
Estructura de líneas de transmisión	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 Ω
Subestaciones de media tensión	10 Ω
Protección contra rayos	10 Ω

Fuente: IEC 60364-4-442.

Cuando por valores altos de resistividad del terreno, de elevadas corrientes de falla a tierra o tiempos de despeje de la misma, o que por un balance técnico-económico no resulte práctico obtener los valores de la tabla de valores de resistencia a tierra, siempre se debe garantizar que las tensiones de paso, contacto y transferidas en caso de un falla a tierra no superen las máximas permitidas.

2.4. Características del suelo para la puesta a tierra.

Reunir las características necesarias para implementar un SPT en un lugar específico, no es tarea fácil, existen factores muy importantes a tomar en cuenta en la construcción del SPT, a continuación se presentan las siguientes:

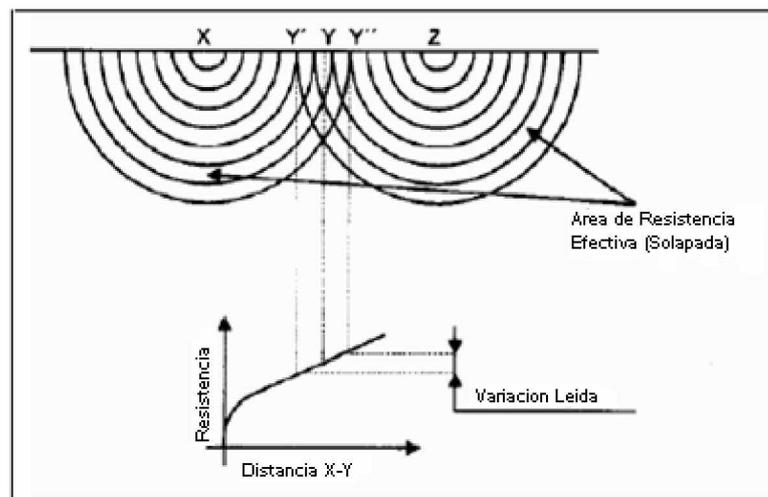
2.4.1 Gradiente de voltaje en el suelo.

La resistividad del suelo no se afecta por el gradiente de voltaje a menos que posteriormente exceda un valor crítico. El valor cambia un poco con el material del suelo, pero comúnmente este tiene la magnitud de varios kilovoltios por centímetro, una vez se exceda, se desarrollan arcos eléctricos en la superficie del electrodo y avanzan hacia el interior del planeta tierra, así como, para incrementar la capacidad efectiva del electrodo hasta que los gradientes se reduzcan a valores que el material del suelo pueda soportar. Ésta condición se ilustra por la presencia de aberturas en la figura 22. Debido a que el sistema de aterrizaje de la subestación normalmente está diseñada para cumplir con más criterios que los límites del voltaje de paso y de toque, el gradiente se asume siempre que esté abajo del rango crítico.

La medición de la RPT por el método de Caída de Potencial genera gradientes de potencial en el terreno producto de la inyección de corriente por tierra a través del electrodo de corriente. Por ello, si el electrodo de corriente, el de potencial y el sistema de puesta a tierra se encuentran muy cercanos entre

si, ocurre un solapamiento de los gradientes de potencial generados por cada electrodo: resultando una curva en la cual el valor de resistencia medida se incrementa con respecto a la distancia, tal como se muestra en la figura 22.

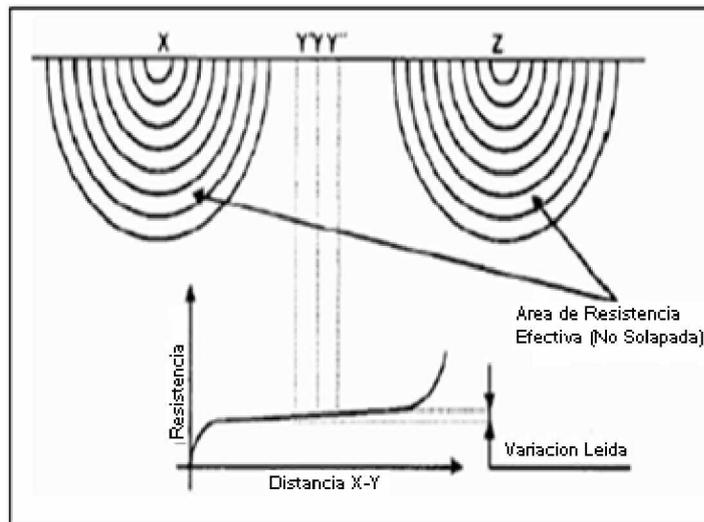
Figura 22. Solapamiento de los gradientes de potencial



Fuente: NTC 2050.

Al ubicarse el electrodo a una distancia lo suficientemente lejos del sistema de puesta a tierra a medir, la variación de posición del electrodo de potencial, desde la puesta a tierra hasta el electrodo de corriente, no produce solapamiento entre los gradientes de cada electrodo, originándose entonces una curva como la mostrada en la figura 23.

Figura 23. Curva de resistencia versus distancia sin solapamiento de gradientes de voltaje



Fuente: NTC 2050.

En la figura 23 puede observarse como existe una porción de la curva que permanece casi invariable, la cual será más prolongada o corta dependiendo de la separación de los electrodos de corriente (Z) y bajo prueba (X). El valor de resistencia asociada a este sector de la curva será el correcto valor de resistencia de puesta a tierra.

2.4.2 Efecto de la magnitud de corriente.

La resistividad del suelo en las cercanías de los electrodos de tierra se puede afectar por la circulación de corriente desde los electrodos hacia dentro del suelo adyacente. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo determinan si una corriente de magnitud y duración dada causa una sequedad significativa y así incrementar la resistividad efectiva del suelo.

No se debe exceder el valor promedio de la densidad de corriente de 200 A/m cuadrado por segundo.

2.4.3 Uso de capas del material superficial.

La graba o capa de material superficial, se utiliza comúnmente con una profundidad de 0.08 a 0.15m (3 a 6 pulgadas), para retardar la evaporación de la humedad y así, limitar que la capa superior del suelo se seque en la estación seca del año durante un periodo prolongado. Cubrir la superficie con un material de alta resistividad es valioso para reducir las descargas de corriente.

El rango de los valores de la resistividad para la capa del material superficial depende de muchos factores, algunos de los cuales son: tipo de piedra, tamaño, condición de la piedra (limpia o fina), el tipo de contenido de humedad, la contaminación atmosférica, etcétera. La tabla IV indica que la resistividad del agua con la cual la roca se humedece tiene una influencia considerable en la medición de la resistividad de la capa del material superficial que se utiliza en ambientes áridos. Las condiciones locales, tamaño y tipo de piedra que se indican en la tabla IV pueden afectar el valor de la resistividad, es importante que se tomen las mediciones de resistividad de las muestras, del tipo de roca, que se han estado utilizando en un área específica.

La tabla IV muestra los valores característicos de la resistividad para los diferentes tipos de material superficial, que se obtienen en muchas partes y en regiones diferentes, estos valores no son válidos para todos los tipos de suelos y el tamaño del material que se encuentre en cierta región de estudio. Ya que se deben realizar las pruebas correspondientes para determinar la resistividad del suelo debido a su degradación.

Tabla IV. Resistividad de materiales superficiales característicos

Numero	Descripción del Material de superficie	Resistividad de la muestra $\Omega\text{-m}$	
		Seco	Húmedo
1	Granito	140×10^6	1300 (Agua superficial, 45 $\Omega\text{-m}$)
2	Granito molido 1.5 pulg. (0.04 m)	4000	1200 (agua llovida, 100 $\Omega\text{-m}$)
3	Granito molido 0.75 1 pulg. (0.02 – 0.025 m)	-----	6513 (10 min. despues de drenar agua a 45 $\Omega\text{-m}$)
4	Granito limpio 1-2 Pulg. (0.025 – 0.05 m)	1.5×10^6 a 4.5×10^6	500 (agua de lluvia, 100 $\Omega\text{-m}$)
5	Granito limpio 2-4 Pulg. (0.05 – 0.1 m)	2.6×10^6 a 3×10^6	10,000 (agua de lluvia, 100 $\Omega\text{-m}$)
6	Piedra caliza	7×10^6	2,000-3,000 (agua superficial 45 $\Omega\text{-m}$)
7	Granito limpio similar a la grava 0.75 pulg. (0.02 m)	2×10^6	10,000
8	Granito lavado	10×10^6	5,000
9	Granito lavado #57 (0.75 pulg.) (0.02)	190×10^6	800 (agua superficial 45 $\Omega\text{-m}$)
10	Asfalto	2.6×10^6 a 30×10^6	10,000 a 6×10^6
11	Concreto	1×10^6 a 1×10^9	21. a 100

Fuente: IEEE, estándar 80-200.

2.5 Factores que afectan el sistema de puesta a tierra.

Básicamente los terrenos se caracterizan por su resistividad, es importante que la resistividad sea lo mas baja posible. Puesto que los terrenos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, un terreno dado tiene una resistividad aparente que promedia los efectos de las diferentes capas que componen el terreno.

La resistividad varía de un terreno a otro, ya que esta es una composición de rocas, gases, agua y materiales orgánicos e inorgánicos. El uso del suelo, como medio de corrientes eléctricas, depende de su conductividad, por lo que requiere de la presencia de sustancias solubles y concentradoras de humedad, que varían según los terrenos y pueden ser mejoradas técnicamente.

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina "Resistividad Aparente".

La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, y depende en gran medida de los factores siguientes.

- Naturaleza del terreno.
- Humedad.
- Temperatura.
- Contenido químico.
- Salinidad.
- Estratigrafía (capas de terreno).
- Variaciones estacionales.
- Granulometría
- Compactación.

2.5.1 Naturaleza del terreno.

El suelo puede formarse y evolucionar a partir de la mayor parte de los materiales rocosos, siempre que permanezcan en una determinada posición, la formación del suelo es un proceso en el que las rocas se dividen en partículas menores mezclándose con materia orgánica en descomposición. El lecho rocoso empieza a deshacerse por los ciclos de hielo-deshielo, por la lluvia y por otras fuerzas del entorno. Al desarrollarse el suelo, se forman capas llamadas horizontes. El horizonte A, más próximo a la superficie, suele ser más rico en materia orgánica, mientras que el horizonte C contiene más minerales y sigue pareciéndose a la roca madre. Con el tiempo, el suelo puede llegar a sustentar una cobertura gruesa de vegetación reciclando sus recursos de forma efectiva. En esta etapa, el suelo puede contener un horizonte B, donde se almacenan los minerales lixiviados. La tabla V muestra la resistividad de varios tipos de terrenos.

Tabla V. Resistividad de acuerdo a la naturaleza del terreno

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN (Ω -m)
Terrenos Pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	50
Margas arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurasico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silicea	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres precedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

2.5.2 Efecto de la humedad, temperatura y contenido químico en el suelo.

El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. La resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de este. Pero un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Puede tenerse el caso, de que en tiempo de sequía, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0°C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra.

La temperatura del terreno es directamente proporcional a la temperatura exterior, pero también depende de la profundidad a la que midamos y del tiempo que permanezcan las bajas temperaturas, puesto que el terreno es un gran almacén de calor y tiene una gran inercia térmica.

A -5°C se puede congelar el agua de una pequeña capa superficial del terreno. Si esta temperatura se mantiene durante muchas horas, el grosor de esta capa irá aumentando progresivamente, hasta que la capa de suelo se convierta en un dieléctrico mal conductor.

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica por esta razón en la mayoría de los suelos aumenta abruptamente siempre que el contenido de humedad sea menor del 15% del peso del suelo. La cantidad de

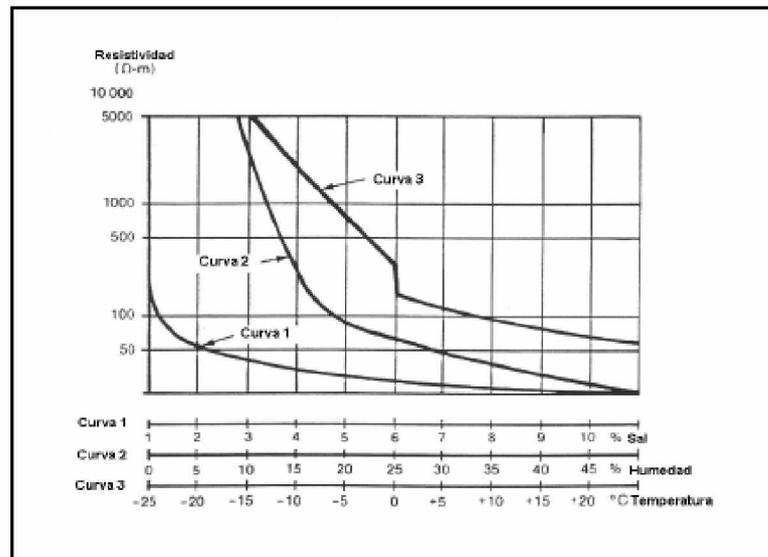
humedad depende del tamaño del grano, la solidez y la variabilidad de los tamaños del grano, sin embargo, tal como nos muestra la curva 2 de la figura 24, una vez el contenido de humedad exceda el 22% la resistividad es afectada.

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo, es casi despreciable para temperaturas por arriba del punto de congelamiento. El agua que contiene el suelo comienza a congelarse a los 0°C y la resistividad comienza a aumentar rápidamente.

La curva 3 ilustra la variación característica para un suelo de tierra arenosa que contenga 15.2% de humedad por peso.

La composición y la cantidad presente de sales solubles, ácidas o alcalinas en el suelo pueden afectar considerablemente su resistividad. En la curva 1 de la figura 24 se ilustra la característica de la resistividad de un suelo que contiene un 30% de humedad por peso, al utilizar la sal (cloruro de sodio) para tratarlo.

Figura 24. Efecto de la humedad, temperatura y sal sobre la resistividad del suelo



Fuente: IEEE, estándar 142-1991.

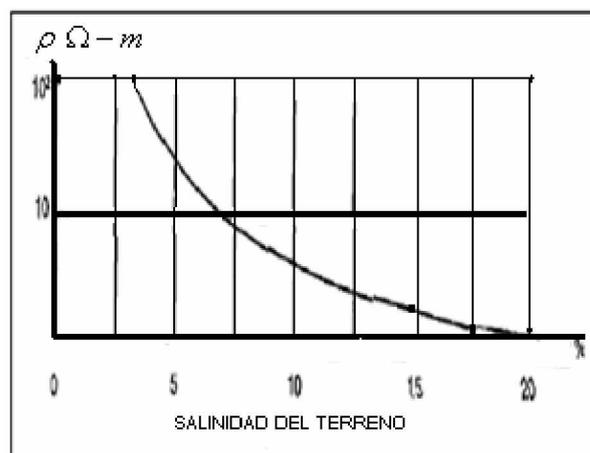
2.5.3 Salinidad.

Las sales disueltas en el terreno, tienen gran influencia en la resistividad aparente del terreno, llegan incluso a convertir terrenos malos conductores, en terrenos buenos conductores.

Uno de los sistemas más utilizados para aumentar la resistividad del terreno, es añadir sal y posteriormente regar. Los aditivos químicos más conocidos son la sal industrial combinada con capas con carbón, que es la fórmula clásica y los productos denominados sales higroscópicas o gel. La sal industrial (C_1Na) multiplica la conductividad del terreno, el carbón conserva un cierto nivel de humedad y ayuda a que el agua descienda a niveles más bajos hasta el extremo inferior del electrodo.

Las sales higroscópicas tienen la cualidad de conservar la mayor cantidad de humedad en el volumen en que están contenidas. Es algo análogo al efecto de una esponja, eso se denomina higroscopia. La figura 25 muestra la gráfica de la variación de la resistividad en función del porcentaje de salinidad.

Figura 25. Variación de la resistividad en función del porcentaje de salinidad



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

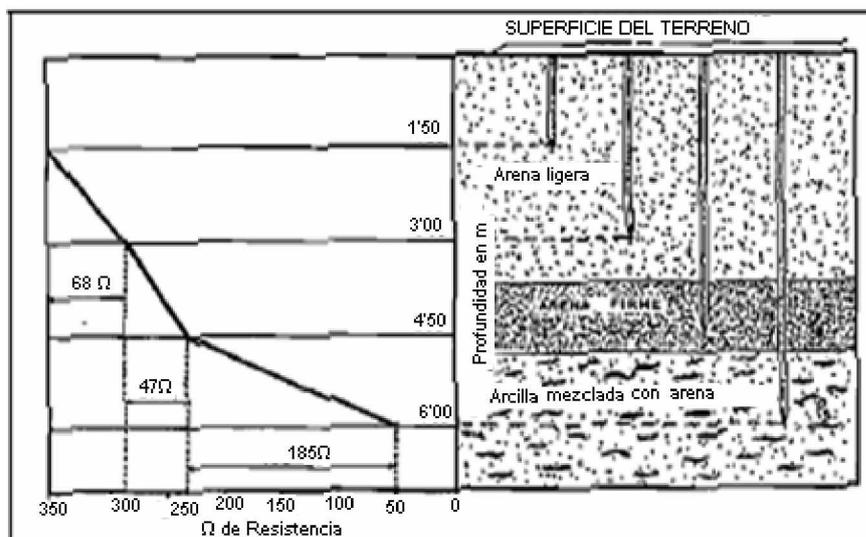
2.5.4 Estratigrafía.

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3m de longitud de una varilla de electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos. Los suelos tienen conformación estratificada, con capas superpuestas de diferente resistividad, que se han conformado debido a los procesos de meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos a través de las edades geológicas. Cuando los suelos son planos, las capas son

gruesas y laminares, y cuando son accidentados las capas son delgadas e irregulares.

Al medir la resistividad aparente del terreno con un telurómetro el valor obtenido será un valor medio de resistividad, de cada capa afectada por el espesor de las mismas. A veces ocurre que una sola capa de terreno presenta una resistividad tan baja que hace imperceptible la de las demás (Zona con agua). La figura 26 muestra la variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno.

Figura 26. Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno



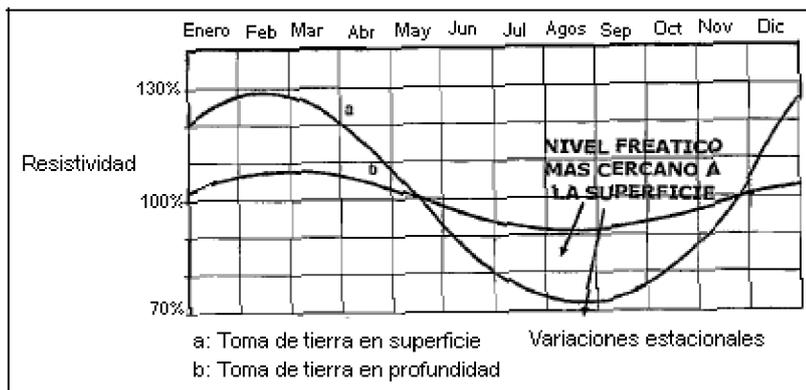
Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

2.5.5 Variaciones estacionales.

Las variaciones estacionales repercuten en gran medida en los suelos, el factor que más se pronuncia es el pH de la tierra. Las explicaciones de éste fenómeno se encuentran en los cambios de régimen de lluvias, variaciones de

salinidad, y en las modificaciones biológicas del suelo. El efecto de estos factores se traduce en un pH bajo en épocas secas, y en uno mayor en épocas lluviosas, el aumento de pH en épocas lluviosas se debe al efecto de delusión. La figura 27, muestra la variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales a lo largo de un año, además muestra el efecto de la profundidad.

Figura 27. Variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

2.5.6 Granulometría.

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica. Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los

granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y que ésta sea mayor que la de la arcilla.

2.5.7 Compactación.

Compactar es la operación previa, para aumentar la resistencia superficial de un terreno sobre el cual deba construir una obra. Consiste en aplicar una cantidad de energía, la cual es necesaria para producir una disminución apreciable del volumen de hueco del material utilizado.

El suelo como cualquier elemento natural, posee un equilibrio entre los diversos factores que lo influyen. Un cambio de este equilibrio puede provocar una alteración física, química o biológica. La compactación es la principal causa de alteración del suelo.

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se debe colocar siempre los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

2.6 Mediciones de resistividad del suelo.

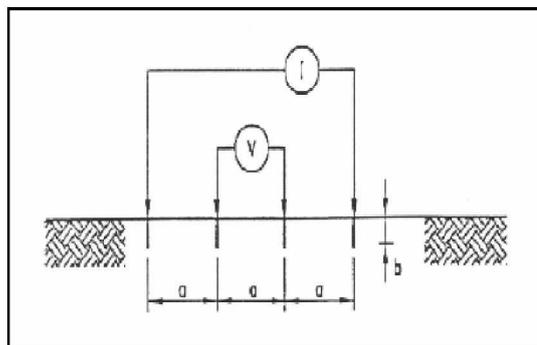
Estimaciones que se basan en la clasificación de los suelos proporcionan una aproximación general de la resistividad. Por lo tanto, es imprescindible realizar pruebas de resistividad, estas se deben realizar en diferentes lugares dentro del área. Raramente se encuentran suelos con resistividad uniforme y a una profundidad considerable dentro de la zona del SPT. Normalmente se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad, a menudo suelen ocurrir cambios laterales, pero en comparación con los cambios verticales, estos suelen ser aun más graduales. Se pueden hacer pruebas de resistividad en el suelo para determinar si existe alguna variación importante de resistividad con la profundidad. Cuando las variaciones son grandes, se deben

tomar aún más lecturas, especialmente si las lecturas son tan altas que indican problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable realizar pruebas a diferentes distancias para obtener un estimado de la resistividad de las capas mas profundas. Esto es posible ya que a medida se incrementa la distancia de las pruebas, las corrientes de prueba penetran en áreas mas distantes, en direcciones verticales y horizontales, sin importar cuanto se desvíe la trayectoria de la corriente debido a la variación de las condiciones del suelo.

El método de cuatro electros de Wenner como se muestra en la figura 28, generalmente es la técnica que más se utiliza. Se realizan cuatro pruebas dentro de la tierra a lo largo de una línea estrecha, a una distancia igual "a" una de la otra, y a una profundidad "b" se mide el voltaje entre los dos electrodos internos y luego es dividido entre la corriente de los electrodos externos, para así, dar el valor de la resistencia R.

Figura 28. Método de Wenner de 4 pines



Fuente: IEEE, estándar 81-1983.

$$p_a = \left[\frac{[4 \cdot \pi \cdot a \cdot R]}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \right] \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

- p_a Es la resistividad aparente del suelo en $\Omega \cdot m$
- R Es la medición de la resistencia en Ω .
- a Es la distancia entre los electrodos adyacentes en m.
- b Es la profundidad de los electros en m.

Si b es pequeño comparado con a implica que la distancia entre electrodos auxiliares es grande comparada con la profundidad a la que se entierran, y la ecuación 1 se puede reducir a:

$$p_a = [2 \cdot \pi \cdot a \cdot r] \quad \text{Ecuación (2)}$$

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pruebas de espacios pequeños, mientras que la mayoría de la corriente penetra mas adentro del suelo para distancias más grandes, se puede asumir, con aproximaciones razonables una resistividad aparente que se toman de las pruebas de medida de resistividad a una distancia dada a una profundidad "b" cuando los contrastes de la resistividad de las capas de los suelos no son excesivos. La ecuación 1 y la ecuación 2 se pueden utilizar para determinar la resistividad aparente a una profundidad "b".

Figura 29. Megger de cuatro terminales



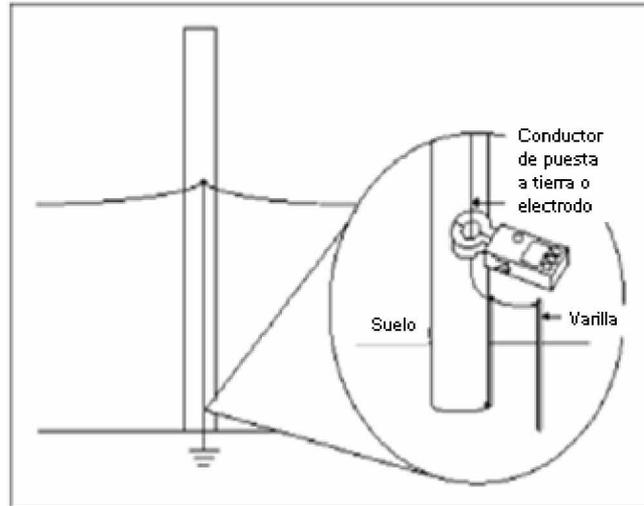
Fuente: Revista instrumentos de medición, Texas Instrument.

2.6.1 Medida de la RPT por medio del medidor tipo pinza.

Este es un método práctico que viene siendo ampliamente usado para medir la puesta a tierra en sitios donde es imposible usar el método convencional de caída de potencial, como es el caso de lugares densamente poblados, celdas subterráneas, centros de grandes ciudades, etc.

El medidor tipo pinza mide la resistencia de puesta a tierra de una varilla o sistema de puesta a tierra simplemente abrazando el conductor de puesta a tierra como lo ilustra la figura 30.

Figura 30. Medición de la RPT utilizando el medidor tipo pinza



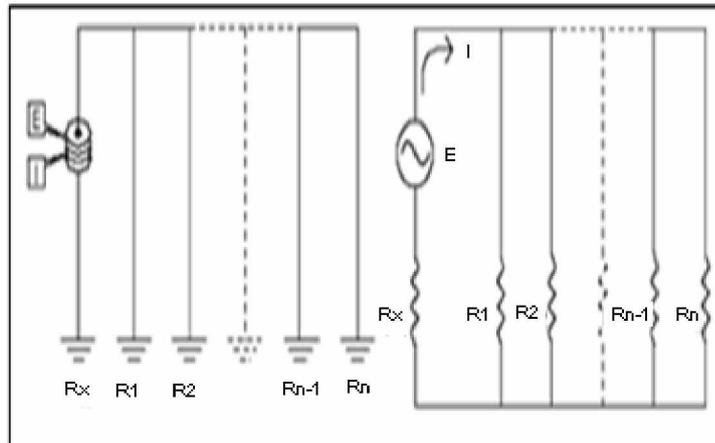
Fuente: IEEE, estándar 81-1983.

2.6.2 Medición de la RPT en un sistema multiaterrizado.

El neutro de un sistema multi-aterrizado puede ser representado como el circuito simple de resistencias de puesta a tierra en paralelo ver figura 31. Si un voltaje "E" es aplicado al electrodo o sistema de puesta a tierra Rx, la corriente "I" resultante fluirá a través del circuito.

Típicamente los instrumentos poseen un oscilador de voltaje a una frecuencia de 1.6 KHz. y la corriente a la frecuencia generada es recolectada por un receptor de corriente. Un filtro interno elimina las corrientes de tierra y ruido de alta frecuencia.

Figura 31. Circuito equivalente para un sistema multi-aterrizado



Fuente: IEEE, estándar 81-1983.

La relación entre el voltaje y la corriente es determinada por el instrumento y se desplegada en forma digital. El método está basado en la suposición de que la impedancia del neutro del sistema multi-aterrizado, excluyendo el electrodo bajo medida, es muy pequeña y puede ser asumida igual a cero. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{E}{I} = R_x + \frac{1}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{R_k} \right)} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

- E Es el voltaje aplicado al electrodo.
- I Es la corriente resultante.
- R_x Representa la resistencia de puesta a tierra.

Con esta suposición, la lectura indicada representa la resistencia de puesta a tierra del sistema o electrodo que se está midiendo.

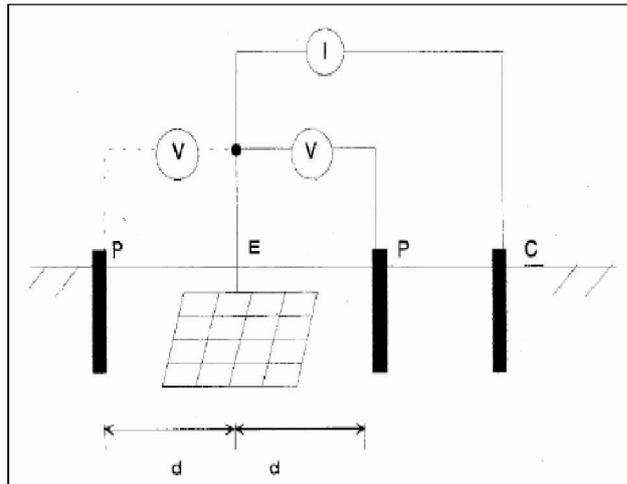
El método posee las siguientes limitaciones:

- La aplicación es limitada a electrodos conectados a sistemas multi-aterizados de baja impedancia.
- Conexiones corroídas o partidas del neutro del sistema pueden influenciar las lecturas.
- No es aplicable a sistemas de puesta a tierra aterizados en múltiples puntos (torres de transmisión o mallas de subestaciones).
- Ruido de alta frecuencia en el sistema podría influenciar las lecturas.
- El cable de conexión con el electrodo abierto.

2.6.3 Método de caída de potencial.

La resistencia de puesta a tierra debe ser medida antes de la puesta en funcionamiento de un sistema eléctrico, como parte de la rutina de mantenimiento o excepcionalmente como parte de la verificación de un sistema de puesta a tierra. Para su medición se debe aplicar el método de Caída de Potencial, cuya disposición de montaje para medición se muestra en la figura 32.

Figura 32. Método de caída de potencial para medir la RPT



Fuente: IEEE, estándar 81-1983.

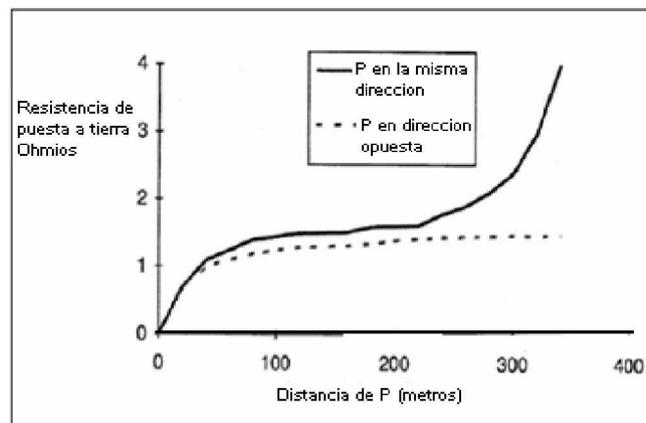
El método consiste en pasar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar (**C**) y medir el voltaje con la ayuda de un electrodo auxiliar (**P**) como muestra la figura 32. Para minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente, se coloca generalmente a una sustancial distancia del sistema de puesta a tierra. Típicamente ésta distancia debe ser cinco veces superior a la dimensión más grande del sistema de puesta a tierra bajo estudio.

El electrodo de voltaje debe ser colocado en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también puede ser colocado en la dirección opuesta como lo ilustra la figura 32. En la práctica, la distancia "d" para el electrodo de voltaje se elige al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta distancia está basada en la posición teóricamente correcta para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo de resistividad homogénea.

La localización del electrodo de voltaje es muy crítica para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra. La localización debe ser libre de cualquier influencia del sistema de puesta tierra bajo medida y del electrodo auxiliar de corriente. La manera más práctica de determinar si el electrodo de voltaje está fuera de la zona de influencia de los electrodos es obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de voltaje en varios puntos entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente. Dos o tres lecturas constantes y consecutivas pueden asumirse como representativas del valor de resistencia verdadera.

La figura 33 muestra una gráfica típica de resistencia contra distancia del electrodo de voltaje (**P**). La curva muestra como la resistencia es cercana a cero cuando (**P**) se acerca al sistema de puesta a tierra y se aproxima al infinito hacia la localización del electrodo de corriente (**C**). El punto de inflexión en la curva corresponde a la resistencia de puesta a tierra del sistema bajo estudio.

Figura 33. Gráfica de resistencia de puesta a tierra versus distancia de Electrodo (P)



Fuente: IEEE, estándar 81-1983.

2.6.4 Medición de RPT en pararrayos.

La medición de ésta RPT es de especial cuidado puesto que pueden aparecer, en el momento de la medida, corrientes extremadamente altas de corta duración debido a descargas atmosféricas por el funcionamiento propio del pararrayo. En un pararrayos aislado y puesto a tierra, el conductor de puesta a tierra nunca debe ser desconectado para realizar la medición porque la base del pararrayos puede estar elevada al potencial de la línea. La medición debe ser realizada una vez se tengan todas las precauciones de rigor.

2.7 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad.

Comúnmente es imposible lograr la reducción que se desea en la resistencia de tierra al agregar más varillas o electrodos de tierra. Una solución alterna efectiva es, incrementar el diámetro de los electrodos, al modificar el suelo alrededor del electrodo. La capa interna del suelo más cercana al electrodo, normalmente comprende la mayor parte de la resistencia de tierra del electrodo hacia la tierra, este fenómeno se utiliza como ventaja de la siguiente manera.

- El uso de cloruro de sodio (sal), magnesio y sulfato de cobre o cloruro de calcio, incrementa la conductividad del suelo inmediatamente alrededor del electrodo. Este tratamiento es muy criticado debido a que se forma lixiviación (tratamiento del suelo con una sustancia compleja, para separar las partes solubles). Además, el tratamiento de sal debe renovarse periódicamente.
- El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene el mineral montmorillonita, el cual se formó por la acción volcánica hace muchos años. No es corrosivo, es estable y tiene una resistividad de $2.5 \Omega\text{-m}$ en una humedad del 300%. La baja resistividad resulta principalmente de un proceso electrolítico entre el agua, soda potasio, lima magnesia y

otras sales minerales que se ionizan formando un electrolito fuerte con un rango de pH entre ocho y diez. Este electrolito se une gradualmente, como parte de la arcilla misma. Provista con una cantidad suficiente de agua, este incrementa hasta trece veces su volumen seco y se sumará a cualquier superficie que contacte. Debido a su naturaleza giroscópica, este actúa como un agente de secado que atrae cualquier humedad disponible del ambiente que lo rodea. La bentonita necesita agua para obtener y mantener sus características favorables, su contenido de humedad inicial se obtiene en una instalación cuando se prepara la mezcla. La mayoría de los suelos tienen suficiente humedad, por lo tanto, la sequedad no es un problema, la naturaleza giroscópica de la bentonita aprovecha la disponibilidad de agua para mantener su condición. Si se expone directamente a la luz solar, esta tiende a aislarse, previniendo que el proceso de sequedad penetre mucho más, esto no puede funcionar en un ambiente totalmente seco, debido a que la mezcla se puede contraer y agrietarse; de esta manera pierde contacto con el electrodo incrementando la resistencia del mismo.

- Los materiales mejoradores de suelos, algunos con una resistividad menor de $0.12 \Omega\text{-m}$ ($\pm 5\%$ de la resistividad de la bentonita) se colocan comúnmente alrededor de la varilla o alrededor de los conductores de aterrizaje que se encuentran en una zanja, en una forma seca o en un compuesto pre-mezclado. Algunos de estos materiales son permanentes y no derraman ningún químico dentro del planeta. Otros materiales mejoradores de suelos disponibles se mezclan con la tierra del lugar en diferentes cantidades y se derraman lentamente en el suelo disminuyendo su resistividad.

2.8 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo.

La interpretación de la resistividad obtenida en el campo es quizá, la parte más difícil del programa de medición. El objetivo básico es obtener un modelo del suelo que sea aproximadamente igual al suelo existente. La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad y depende también de los estratos del suelo. Pueden ocurrir variaciones temporales en la resistividad de acuerdo a las variaciones del clima, se debe reconocer que el modelo del suelo es solamente una aproximación de las condiciones del suelo en el momento de realizar las mediciones.

Los modelos de resistividad más comúnmente utilizados, es el modelo del suelo uniforme y el modelo del suelo de dos capas. El modelo de dos capas es a menudo un aproximado de demasiadas estructuras del suelo, mientras que los modelos de suelos de múltiples capas son utilizados para suelos en condiciones más complejas. La interpretación de las mediciones de resistividad del suelo se pueden determinar por técnicas de análisis manuales o utilizando programas de computadora.

Un modelo de suelo uniforme se utiliza solo cuando existe una variación moderada en la resistividad aparente. Para suelos con condiciones homogéneas, que en la práctica raramente sucede, el modelo de suelo uniforme es razonablemente preciso. Si hay una variación grande en la medición de la resistencia aparente, el modelo del suelo uniforme es poco probable que nos de un resultado preciso.

Una representación más exacta de las condiciones presentes en el suelo se obtiene utilizando el modelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste en una capa superior de profundidad finita con una resistividad diferente a una capa inferior de espesor infinito.

Existen demasiadas técnicas para determinar un modelo equivalente de dos capas de resistividad aparente contra la profundidad de las medidas de la barra conductora o la resistividad aparente contra las mediciones de espaciamiento del método de cuatro electrodos de Wenner.

3. EFECTO CATÓDICO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, que esta siendo aplicada con mucho éxito en el mundo entero, cada día se hacen necesarias nuevas instalaciones de conductos para transportar petróleo, agua, productos terminados, cables eléctricos y otras instalaciones importantes.

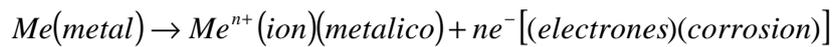
La protección catódica se utiliza para minimizar los efectos de la corrosión en tuberías metálicas, estructuras enterradas, tanques instalados a la intemperie bajo tierra. Esta reacción electroquímica es un cambio químico que implica el transporte de cargas eléctricas de un área a otra.

Se puede aplicar protección catódica en metales como: acero, cobre, latón y aluminio. Como condición fundamental, las estructuras a proteger y el elemento de sacrificio, deben mantenerse en contacto eléctrico e inmerso en un electrolito.

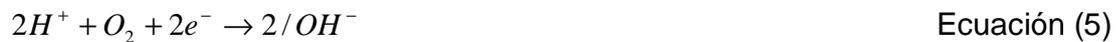
La corrosión casi siempre es de origen electroquímico. Este tipo de reacción es un cambio químico que engloba el transporte de cargas eléctricas. Cuando una corriente eléctrica circula entre los polos positivo (ánodo) y negativo (cátodo) de un sistema a través de una solución llamada electrolito.

Cuando los átomos del ánodo se disuelven para formar iones (partículas químicas cargadas eléctricamente), los electrones libres forman el ánodo (electrodo donde ocurre la oxidación) negativo con respecto a la solución. Sus electrones pasan al cátodo a través del metal y allí neutralizan a los iones positivos.

La corrosión se sostiene mediante procesos anódicos y catódicos simultáneos. El anión es el ion cargado negativamente y el catión es el ion cargado positivamente. Las reacciones anódicas se llevan a cabo de la siguiente manera:

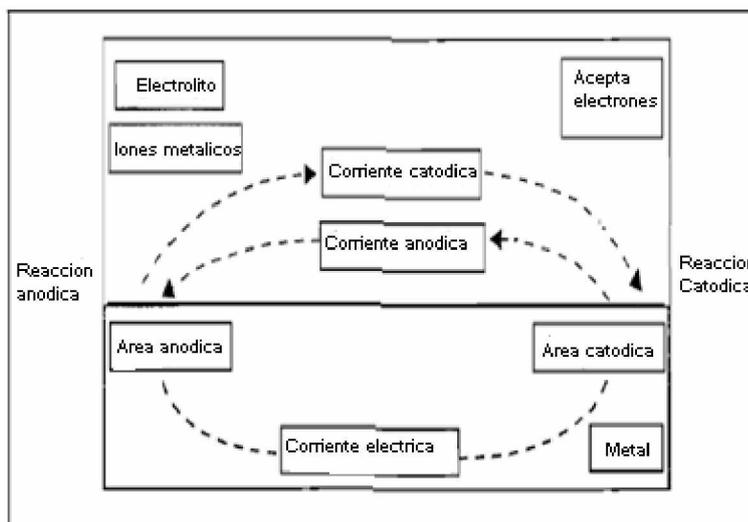


Las reacciones catódicas se llevan a cabo de la siguiente forma:



La figura 34 muestra la reacción electroquímica la cual implica el transporte de cargas eléctricas de un punto a otro.

Figura 34. Reacción electroquímica



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

En el caso del concreto, la protección catódica es la única tecnología que puede usarse para detener la corrosión una vez que el concreto se ha contaminado con sales.

Es preciso distinguir la corrosión atmosférica y la que enfrentan las estructuras enterradas y sumergidas con el fin de seleccionar los métodos adecuados de protección. En el caso de metales situados en una atmosfera agresiva, el electrolito es la zona húmeda cercana al metal que no podemos modificar excepto en ciertos casos mediante inhibidores en fase de vapor.

En atmósferas agresivas no se emplea la protección catódica clásica y solo queda como solución el diseño y la selección del metal y el empleo de recubrimientos protectores que separen el electrolito de los ánodos y cátodos. Cuando se trata de estructuras enterradas, además de lo anterior es posible aplicar la protección catódica sin modificar el electrolito.

Los métodos de protección catódica utilizando ánodos de sacrificio, y corriente impresa son económicos. En estructuras nuevas la utilización de capas de concreto impermeables para sellar las membranas o las varillas de refuerzo pueden dar buenos resultados, pero el concreto ya contaminado la única solución es la protección catódica, la cual previene el proceso de corrosión de estas estructuras.

La corrosión del acero es un proceso electroquímico. El proceso de corrosión funciona como una batería: una corriente fluye desde el ánodo (elemento que se corroe), a través del electrolito, hacia el cátodo y finalmente retorna por medio de una trayectoria metálica. Esta batería en miniatura es la base para la corrosión de acero rodeado de concreto. Si uno de los elementos de esta batería se remueve, la corrosión desaparece.

La protección catódica es un sistema eléctrico externo que provee corrientes que contrarrestan aquellas de la celda corrosiva, remueve un elemento de esta y detiene así la corrosión. La protección catódica ataca la raíz de la corrosión.

3.1 Electrolito.

El electrolito es un compuesto químico (sal, ácido o base) que se descompone en iones cargados eléctricamente cuando se disuelve en un solvente.

El electrolito o medio corrosivo puede ser producto de diferencias de temperatura o pH, de aireación o concentración de oxígeno, entre otros factores. El contenido de oxígeno es un factor importante que determina la corrosión; las partes más aireadas funcionan como cátodo y las que reciben menos aire funcionan como ánodo. Este proceso de corrosión puede tener su origen en uniones de distintos metales, en diferencias de resistividad de los suelos o en la presencia de corrientes parásitas.

3.2 Corrosión.

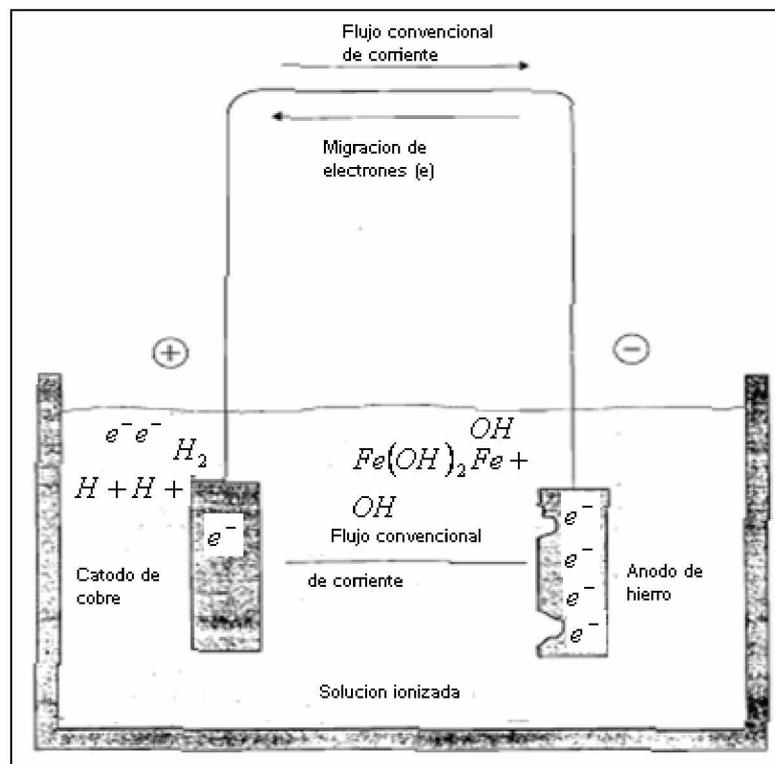
Es un proceso de oxidación, también se define como un ataque químico y se conoce como un fenómeno eléctrico o electrolisis. Estas definiciones son ciertas en forma parcial. La corrosión en una tubería metálica básicamente es de naturaleza electroquímica.

La tubería en esencia es un elemento metálico inmerso en un dieléctrico. Debido a variaciones de potencial a lo largo de la tubería se encuentran partes anódicas y catódicas en la extensión de esta. Esta diferencia de potencial entre áreas es la base para formar la celda de corrosión electrolítica. Ver figura 35.

En general, la corrosión es un proceso electroquímico en el que deben estar presentes las cuatro condiciones siguientes:

- Un área positiva o anódica referida como el ánodo.
- Un área negativa o catódica, referida como cátodo.
- Una trayectoria para que la corriente iónica fluya (electrolito).
- Una trayectoria para que la corriente electrónica fluya, lo que normalmente consiste en una trayectoria metálica.

Figura 35. Celda de corrosión electrolítica



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

3.3 Tipos de corrosión.

Existen numerosos tipos de corrosión, a continuación se enumeran los más comunes:

1. Grabado uniforme: consiste en un ataque químico directo mediante sales y ácidos. Si este ataque es persistente, una superficie pulida o brillante pierde el lustre y adquiere una característica áspera.
2. Intergranular: usualmente galvánico, es un ataque selectivo a lo largo de las fronteras granulares de una aleación. Estas aleaciones pueden romperse cuando la corrosión actúa sobre los componentes individuales.
3. Exfoliación: esta se encuentra en metales donde la corrosión ocurre debajo de la superficie metálica y causa la formación de una ampolla por debajo de esta. Ocurre cuando la estructura cristalina del metal cambia de dirección.
4. Galvánica: sucede cuando se tiene la conexión entre dos metales no similares, en un electrolito.
5. Celda de concentración: en esta condición, la cantidad de oxígeno que llega hasta el electrolito, varía, por lo que la rapidez de corrosión también lo hace. En áreas de alta concentración de oxígeno se presenta un menor nivel de corrosión.
6. Fatiga: cuando esta se presenta la corrosión se agrava, pues el metal está sometido a una tensión mecánica. Esto ocurre en los dobleces o en áreas donde se han aplicado remaches. Los metales que se trabajan en frío deben exponerse a calor para disipar esta fatiga. Usualmente la corrosión por fatiga se caracteriza por la presencia de una grieta a lo largo del granulado del metal.

3.4 Corriente catódica circulando en la red.

El potencial eléctrico que se genera entre el ánodo y el cátodo hace fluir la corriente de corrosión. El ánodo es el área que sufre la pérdida de metal y la corrosión. La cantidad de metal removido es directamente proporcional a la corriente circulante.

Si una de las condiciones mencionadas se elimina, cesaran tanto el proceso de corrosión como la pérdida de metal. La protección catódica es uno de los métodos más comunes para mitigar la corrosión en las instalaciones petroleras y tanques metálicos de almacenamiento de todas las industrias, pues elimina todas las áreas anódicas de una estructura metálica bajo tierra.

3.5. Polarización.

La polarización es el cambio de potencial de un electrodo como resultado del flujo de corriente, altera el potencial del ánodo en la dirección catódica y el potencial del cátodo en la dirección de la anódica.

3.6 Control sobre las corrientes circulando en la red de tierras.

Debido a que es posible que el grado de polarización varíe por el tipo de material y solución, es de gran ayuda clasificar las uniones por el tipo de polarización producida en cada electrodo. Los tipos de control se clasifican en:

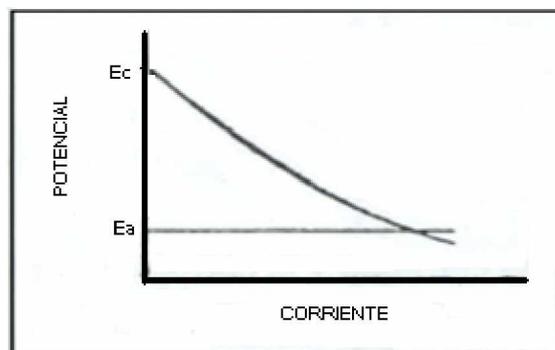
1. Control catódico.
2. Control anódico.
3. Control mixto.
4. Control de resistencia.
5. Control de difusión.

3.6.1 Control catódico.

Si el ánodo no se polariza y el cátodo sí, entonces debido a la baja resistividad, el flujo de corriente es controlado en su totalidad por el electrodo catódico. Si el área del ánodo es duplicada o reducida a la mitad, la pérdida de peso debido a la corrosión catódica del ánodo permanece sin cambios, aunque la intensidad del ataque corrosivo se incrementa con la reducción del área.

Sin embargo, si el área del cátodo es reducida a la mitad, la corrosión catódica del ánodo se reducirá a la mitad; o si el área del cátodo se duplica, la corrosión catódica en el ánodo, también se duplica. Ver figura 36.

Figura 36. Control catódico

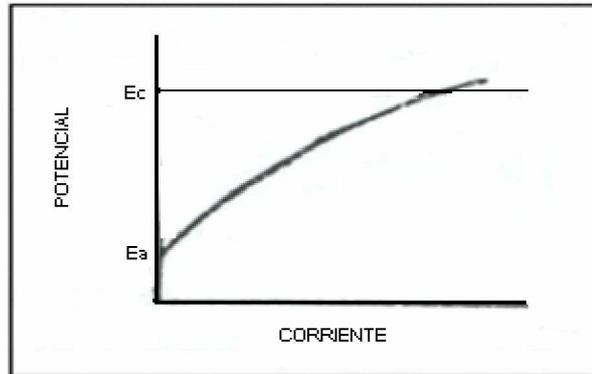


Fuente: Metodología para la protección de estructuras, cables y tubería subterránea considerando el efecto electroquímico de la corrosión galvánica

3.6.2 Control anódico.

Si el ánodo se polariza y el cátodo no, se dice que el sistema está bajo el control anódico. Ver figura 37.

Figura 37. Control anódico



Fuente: Metodología para la protección de estructuras, cables y tubería subterránea considerando el efecto electroquímico de la corrosión galvánica.

3.6.3 Control mixto.

Si ambos, el ánodo y el cátodo se polarizan, entonces de acuerdo con la menor resistividad de flujo de corriente será controlado por la polarización de ambos electrodos, por lo tanto, las áreas de ambos electrodos afectan la corrosión catódica del ánodo.

3.6.4 Control de resistencia.

Si ninguno de los electrodos se polariza, el flujo de corriente y la corrosión catódica existente serán controladas por la resistencia de la trayectoria metálica. Esta resistencia será la que controle la corrosión del ánodo. En general, tanto la polarización como la resistencia controlan la cantidad del flujo de corriente.

3.6.5 Control de difusión.

El factor primordial en la determinación del porcentaje de corrosión es la difusión, porque el porcentaje de difusión es el que controla la forma de las curvas de polarización.

Si un metal como el hierro está inmerso en un electrolito y el hierro tiene poco contacto con el oxígeno, la corrosión debida al oxígeno será casi nula, mientras que si se presenta disolución de oxígeno, la cantidad de hierro corroído es prácticamente equivalente a la cantidad de oxígeno consumido. Si el área del hierro es suficientemente grande, el porcentaje de corrosión es controlado por la proporción a la cual el oxígeno se difunde a través de la reacción electrolito-oxígeno.

Si se conecta un metal como el hierro, totalmente inmerso en el electrolito, con un metal catódico como el cobre, no aumenta el porcentaje de difusión de oxígeno a través de la relación electrolito oxígeno, por lo tanto, la corrosión del hierro no aumenta sobre la ya existente en el hierro antes de la unión con el cobre.

3.7 Ley de Ohm aplicada al efecto catódico.

Al analizar una corriente siempre se considera el flujo y la trayectoria que toma. La trayectoria es el circuito, la corriente es el flujo de electrones. Es muy importante considerar la trayectoria o trayectorias de los electrones hacia la tierra y los electrones que circulan por los conductores en forma controlada. La ley de Ohm muestra la relación entre corriente, voltaje y resistencia de un circuito eléctrico.

$$E = IR$$

Ecuación (7)

Donde:

$E = \text{voltaje.}$

$I = \text{flujo de corriente.}$

$R = \text{resistencia.}$

La fórmula de la ecuación 7 se aplica en la mayor parte de los circuitos y determina la relación entre el voltaje, la corriente y la resistencia o impedancia en caso de un sistema de corriente alterna. Cuanto mayor sea la impedancia menor será el flujo de corriente y cuanto menor sea la impedancia mayor será el flujo de corriente.

La letra E designa la diferencia de potencial o voltaje y se mide en voltios. La letra I se utiliza para denominar el flujo de corriente, y se mide en amperios. La letra R representa la resistencia del circuito y se mide en ohms.

En el efecto catódico, si la corriente que circula por el circuito, es de gran magnitud, y el sistema está bien diseñado, esta corriente activa el disparo instantáneo de los interruptores termo magnéticos de seguridad y los dispositivos de protección del circuito.

3.8 Ley de voltajes de Kirchhoff aplicada al efecto catódico.

La relación fundamental que involucra la corrosión debida al efecto catódico es descrita por la segunda ley de Kirchhoff la cual se presenta a continuación:

$$\sum FEM = \sum IR \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$E_c - E_a = IR_c + IR_m \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

R_c = Resistencia de la porción electrolítica del circuito catódico

R_m = Resistencia de la porción metálica.

E_c = Voltaje eficaz (polarizado) del miembro catódico de la unión.

E_a = Voltaje eficaz (polarizado) del miembro anódico de la unión.

3.9 Aplicación del teorema de superposición en las puestas a tierra.

El teorema de superposición sólo se puede utilizar en el caso de circuitos eléctricos lineales, es decir circuitos formados únicamente por componentes lineales en los cuales la amplitud de la corriente que los atraviesa es proporcional a la amplitud de la tensión a sus extremidades. El teorema de superposición ayuda a encontrar: valores de tensión, en una posición de un circuito, que tiene más de una fuente de tensión y corriente.

Cuando las estructuras a proteger son demasiado grandes, como oleoductos que transportan combustibles, o tanques de gran tamaño, la protección catódica necesita emplear métodos de medición tales como el sistema de ánodo galvánico y sistema de corriente impresa, ambos métodos emplean tensiones y corrientes entre los conductores y electrodos, el teorema de superposición es ideal para poder identificar los valores de resistencia en diferentes puntos a lo largo de las estructuras (tubos y tanques de gran tamaño). Los dos métodos, ánodo galvánico y corriente impresa se detallan posteriormente.

3.10 Métodos de control y protección catódica.

Existen varios métodos para el control de la corrosión:

1. Aislamiento eléctrico.
2. Aplicación de recubrimientos.
3. métodos electroquímicos.

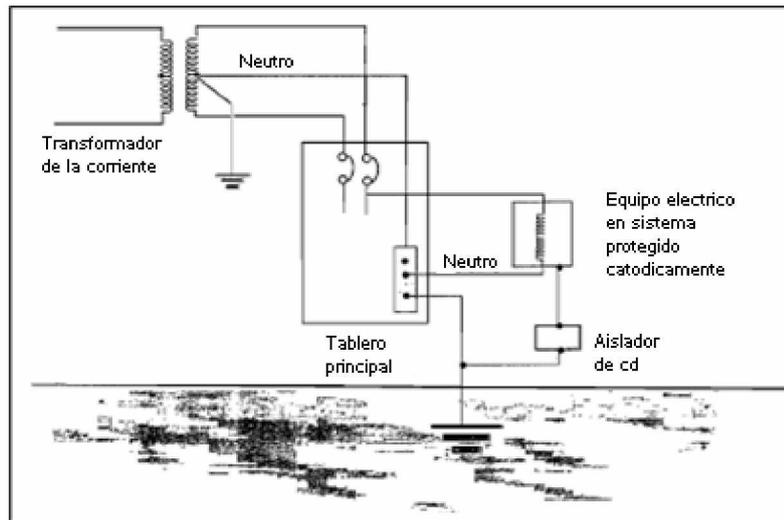
3.10.1 Aislamiento eléctrico.

El primer control de corrosión puede consistir en el aislamiento del sistema de estructuras metálicas cuando estas hayan sido construidas con materiales de distintos potenciales electroquímicos, por lo que deben aislarse eléctricamente.

Es usual que las estructuras protegidas catódicamente tengan necesidades muy incompatibles. En condiciones ideales, un sistema con protección catódica debe estar aislado, pero si contiene equipo eléctrico es preciso ponerlo a tierra.

Uno de los mejores métodos es el uso de aisladores de CD, ya que son productos de estado sólido que proporcionan el aislamiento requerido y simultáneamente brindan acoplamiento de CA y conexión a tierra. Ver figura 38.

Figura 38. Aislamiento eléctrico de CD



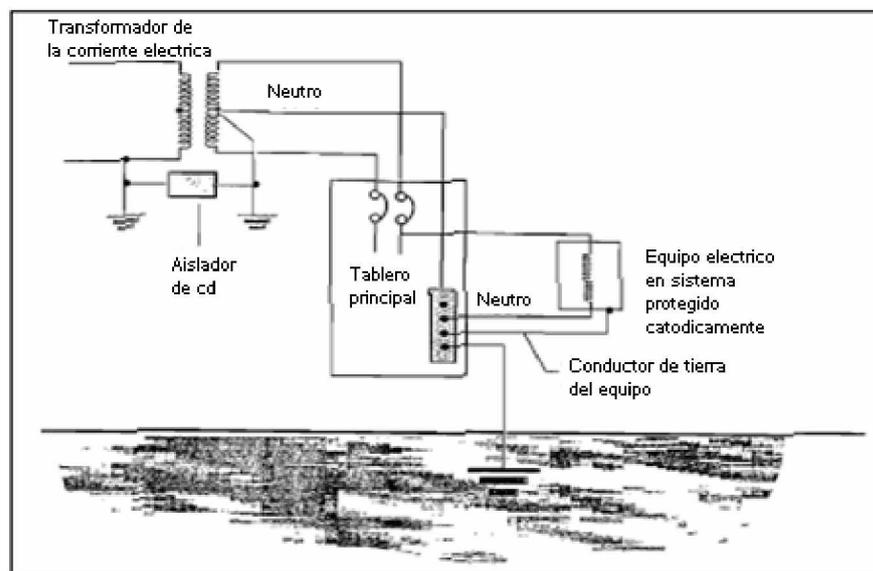
Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

El dispositivo de aislamiento de CD puede instalarse en el conductor del electrodo de tierra, entre el equipo eléctrico y el de servicio. Es importante que la estructura protegida catódicamente se aisle solo con este dispositivo y que no existan otras interconexiones con trayectorias paralelas. En algunos sitios pueden existir demasiadas conexiones entre la tubería y el suelo.

La segunda opción es la ubicación del dispositivo de aislamiento de CD entre la central eléctrica y el sistema de tierra del usuario, lo que puede aislar completamente la instalación de la empresa pública que suministra energía eléctrica.

En este caso, la central eléctrica instala el dispositivo en el transformador que separa los dos sistemas de voltaje y sus tierras. Ver figura 39.

Figura 39. Aislamiento de la central eléctrica



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

Estos dispositivos también moderan el voltaje de CA. Cuando hay estructuras metálicas en la vecindad de línea de alimentación energizada, los campos magnéticos y eléctricos resultantes pueden causar voltajes indeseables en las estructuras.

Es necesario que las tuberías metálicas protegidas catódicamente tengan aislamiento de CD del suelo, mientras que los voltajes inducidos de CA deben contar con una trayectoria de baja impedancia a tierra.

3.10.2 Protección mediante aplicación de recubrimiento protector.

Este método consiste en aplicar un material que proporciona un aislamiento eléctrico continuo, que envuelve las partes metálicas con un compuesto protector que evita el contacto entre el electrolito y el metal.

Este recubrimiento puede ser metálico por inmersión, proyección, electro deposición o deposición química. Lo que se busca es recubrir el metal base con otro que el medio electrolítico no pueda dañar o que forme con el productos pasivos de corrosión.

3.10.3 Protección utilizando pinturas y barnices.

Las pinturas y barnices son recubrimientos que pueden ser clasificados como de secado al aire. Esto significa que tras la aplicación, la película seca esencialmente por oxidación y polimeración. Estos recubrimientos constituyen el conjunto de acabados usados para la protección y el recubrimiento.

Las pinturas y barnices manifiestan una extraordinaria resistencia al agua, no obstante permiten que el vapor de agua y gases penetren y alcancen la cara del metal en cantidades suficientes para dañarlo. Son estos gases disueltos los que aceleran el ataque corrosivo, debido a ello se agregan pigmentos, los cuales mejoran las propiedades mecánicas, y neutralizan los efectos de los gases.

La manera en la cual los pigmentos activos sirven para inhibir la corrosión ha sido condicionada a la alcalinidad y efectos oxidantes. En vista de que los materiales menos catódicos que el cobre, se corroen más rápidamente, los pigmentos básicos retardan y previenen el ataque corrosivo.

3.10.4 Protección utilizando inhibidores de óxidos.

Cualquier sustancia que al ser agregada en pequeñas cantidades al ambiente corrosivo de un metal o aleación y que disminuye el proceso corrosivo es inhibidor. Las formas en que un inhibidor puede funcionar para disminuir el proceso de corrosión es si se toman en cuenta las condiciones de estado estable o el porcentaje límite de corrosión.

Los pigmentos inhibidores de óxido más comunes son los pigmentos reactivos compuestos de plomo o zinc. A menudo se combinan con otros pigmentos reactivos y pigmentos inertes o neutrales. Estos pigmentos naturales, tales como el óxido de hierro, silicato de magnesio y sílice, proporcionan grandes ventajas, incrementan la resistencia del material, proporcionan menor reactividad con el electrolito, y proporcionan una mejor unión entre materiales.

3.10.4.1 Inhibidores de plomo rojo (minio).

Están disponibles en los siguientes grados: 98, 97, 95 y 85%, lo cual indica el porcentaje real de plomo rojo (Pb_3O_4). La razón para su efectividad se basa en la inhibición de la solución anódica del acero o hierro debido a su naturaleza alcalina y oxidante.

3.10.4.2 Inhibidores de zinc.

Este tipo de inhibidor ha incrementado su uso a través de los años como un efectivo inhibidor de óxido. El zinc amarillo, muy conocido ha demostrado su versatilidad en la protección del acero, así como del aluminio y el magnesio. Su función es liberar cromo soluble, el cual produce pasividad en la superficie del material. A menudo muestra una tendencia a formar ampollas o burbujas de agua en presencia de la humedad excesiva.

En ambientes industriales en donde SO_2 está presente, despolariza el material catódico del hidrógeno, y de este modo se estimula la corrosión. La incorporación de pigmentos básicos con el cromato de zinc ayuda a estabilizar los ambientes ácidos.

3.10.5 Protección utilizando materiales resinosos.

Las resinas naturales como la goma fósil y goma laca, son formadas por procesos complicados. Las grandes moléculas formadas como cuerpos proteínicos, celulosas, y hule son materiales para compuestos de recubrimiento. Los compuestos de celulosa han encontrado amplia aplicación como ingredientes para barnices o lacas.

Un método usado para formar resinas sintéticas puras es llamado polimeración por condensación. Las moléculas se hacen más grandes a medida que la condensación toma lugar.

Los tipos de resinas más comunes para aplicarse a los metales que presentan corrosión son los siguientes:

1. Resinas fenólicas.
2. Resinas alquídicas.
3. Resinas de urea.

3.10.5.1 Resinas fenólicas.

Algunas de las resinas de fenol son usadas como resinas de refuerzo con aceites secos. Para completar el proceso de curado se debe disolver la resina con alcohol y solventes por un período de 10 a 40 minutos la reacción alcanza una temperatura de 180 grados centígrados. La mezcla es resistente al agua y a ácidos dentro del electrolito.

3.10.5.2 Resinas alquídicas.

Este tipo de resinas tienen muy buena versatilidad, pueden ser modificadas para obtener resinas duras o suaves. También se pueden alcanzar polímeros. Es posible obtener una gran cantidad de materiales con estas resinas. El revestimiento con estas resinas proporciona a los metales resistencia a la corrosión ante condiciones severas.

3.10.5.3 Resinas de urea.

Cuando el recubrimiento de resina de urea es tratado, una dura mezcla insoluble se forma, debido a que la mezcla es quebradiza se debe unir con resinas alquídicas para conseguir mayor flexibilidad, y así poder lograr mejor resistencia a la corrosión.

3.10.6 Métodos electroquímicos.

Este método de control de corrosión, puede efectuarse ya sea con protección anódica o catódica y la canalización de las corrientes parásitas. De estas opciones la protección catódica es el método más extendido y se aplica sobre todo en los metales enterrados o sumergidos y en los contenedores de líquidos.

3.10.7 Protección catódica.

Se efectúa por medio de una corriente eléctrica aplicada exteriormente, desde los ánodos situados en el mismo electrolito de la estructura metálica que se protege. La corrosión se reduce a cero y es posible mantener una superficie metálica en un medio corrosivo sin sufrir deterioro durante un tiempo indefinido. Para lograrlo se requiere que el metal alcance un determinado potencial en relación con un electrodo de referencia, condición que se denomina potencial de protección. La aplicación de esta técnica se observa en estructuras metálicas sumergidas o

enterradas, y en protecciones internas de depósitos y grandes tubos que contienen agua.

El sistema de protección catódica utiliza dos métodos o categorías principales:

- a) Sistema de ánodo galvánico
- b) Sistema de corriente impresa.

Usualmente la protección catódica se realiza instalando un metal de sacrificio (con una fuerza electromotriz natural más elevada) que se conecta mediante un conductor o alambre a la estructura que se quiere proteger. El magnesio es un ánodo galvánico (o de sacrificio) muy común.

La protección de ánodo galvánico se basa en el potencial eléctrico que se genera en forma natural entre los dos metales, lo que hace circular una corriente.

Como el potencial está limitado a la pequeña diferencia de potencial existente entre los metales, y su corriente es de baja intensidad, este tipo de protección catódica se asocia a estructuras pequeñas o a las protegidas con recubrimientos.

El segundo método de protección catódica más utilizado y conocido se denomina sistema de corriente impresa. Este tipo de protección se basa en una fuente externa de corriente directa, ya sea una batería o un rectificador.

El material anódico se ubica en el electrolito junto con la estructura que se protege, la cual se hace mas positiva conectándola junto con el ánodo a la fuente de corriente. Es posible emplear cualquier material como ánodo de

corriente impresa, pero como la corrosión se efectúa en el ánodo, los materiales de bajo consumo son los más indicados.

El potencial de protección más utilizado es el de -0.85 V con respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 aunque en algunos casos puede utilizarse otro criterio de protección. Para conseguir que la estructura que se quiere proteger alcance el potencial citado, se debe determinar la intensidad de la corriente necesaria. Esta corriente depende de la superficie que se protege, también influyen muchos factores suplementarios relacionados con el electrolito y con el metal involucrado.

La intensidad total necesaria es el producto de la superficie que se va a proteger en metros cuadrados y la densidad de corriente en mA/m^2 .

3.10.8 Aplicaciones prácticas de la protección catódica.

Las aplicaciones prácticas más utilizadas se presentan a continuación:

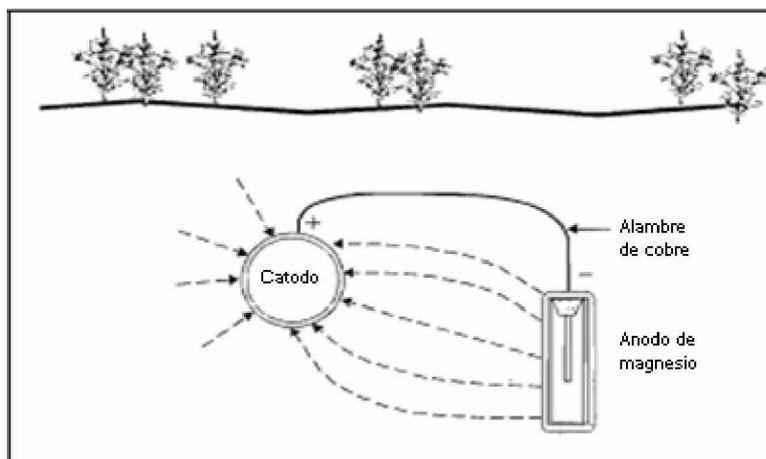
1. ánodo galvánico.
2. Suelo rectificador.

En ambos métodos se aplica una dosis de corriente directa para establecer un potencial de valor negativo en la estructura que se va a proteger.

3.10.8.1 Ánodo galvánico.

Los ánodos galvánicos de magnesio, zinc o aleaciones de aluminio se utilizan en suelos de baja resistencia que no requieren corrientes de alto valor. Estos ánodos se instalan en rellenos de bentonita u otra sustancia que alargue su vida y mejore su operación. Ver figura 40.

Figura 40. Ánodo galvánico



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

3.10.8.2 Ánodos de sacrificio.

Los ánodos de sacrificio más comunes son los formados por aleaciones de zinc, magnesio y aluminio. La tabla VI, muestra las características electroquímicas de algunas aleaciones una vez considerada la reducción por rendimiento de corriente.

3.10.8.3 Ánodos de zinc.

El zinc tiene un potencial de valor elevado, lo que indica un alto rendimiento de corriente. Uno de los factores que pueden limitar la utilización del zinc es la resistividad del medio, por ello es aconsejable emplearlo para resistividades inferiores a 1000 Ohm-cm. Se debe restringir su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas superiores a 65 grados centígrados, ya que estas condiciones pueden invertir su polaridad y hacerlo catódico respecto al acero, o pueden utilizarlo debido a la formación de carbonatos precipitados.

3.10.8.4 Ánodos de aluminio.

Por la posición en la serie electroquímica, el aluminio, especialmente en forma de aleación, es el metal que más se utiliza en aplicaciones de protección catódica.

La utilización del aluminio es similar a la del zinc. Es ideal para la protección catódica de estructuras sumergidas en aguas dulces, en especial una aleación de Al-In. Las aplicaciones más frecuentes son en el campo naval debido a su alta capacidad de conducción de corriente. Un ánodo de aluminio equivale a tres de zinc, y aunque su precio es más elevado, al final resulta más económico por la facilidad de su instalación.

3.10.8.5 Ánodos de magnesio.

Este es un elemento muy reactivo, es decir, tiene la capacidad de proporcionar una elevada densidad de corriente, aunque se consume con gran rapidez. Su principal aplicación es en el caso de ánodos enterrados en el suelo con resistividades intermedias de 2000-10000 Ohms-cm. En suelos con resistividad muy elevadas es aconsejable el uso del sistema de corriente impresa.

Se pueden utilizar otros materiales como ánodos de sacrificio, por ejemplo el hierro, el cual se utiliza para proteger el cobre o el acero inoxidable en casos especiales.

Tabla VI. Características prácticas de algunas aleaciones. Amperios hora de corriente/amperios año de corriente por cada kilogramo de aleación

Aleación	Potencial (Ag/AgCl)	Potencial con respecto al acero protegido (-0.8 V)	Valores prácticos	
			A + h/kg	A + año/kg
Zn (H.S.Ni 1)	-1.05	-0.25	780	0.089
Al-Zn-Sn	-1.07	-0.27	2420	0.276
Al-In	-1.15	-0.35	2740	0.313
Al-Hg	-1.05	-0.25	2830	0.323
Mg	-1.5/-1.7	-0.7/-0.9	1050/1230	0.120/0.140

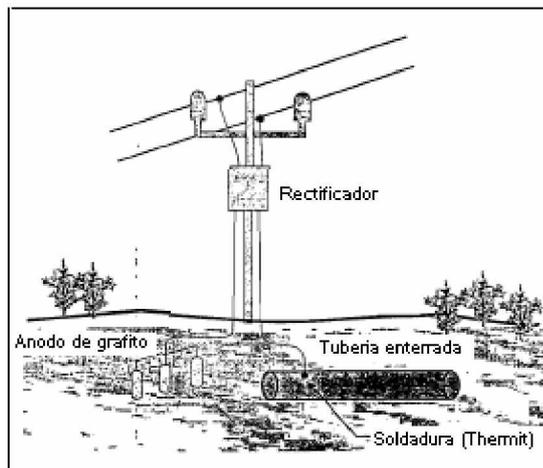
Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

3.11. Suelos rectificadores o protección catódica por corriente impresa.

Este método se realiza de tal forma que la estructura a proteger sea el cátodo y el suelo rectificador sea el ánodo. El suelo rectificador consiste en una cantidad determinada de electrodos enterrados y conectados a la salida positiva del rectificador, la cual se conecta a la estructura.

La ventaja de este sistema es que permite controlar la fuente de alimentación, de acuerdo a su funcionamiento, existen rectificadores manuales o automáticos. En estos últimos, un electrodo es el que controla al sistema, midiendo de manera gradual el potencial de la estructura a proteger y modifica constantemente la salida del rectificador, ver figura 41.

Figura 41. Protección catódica por corriente



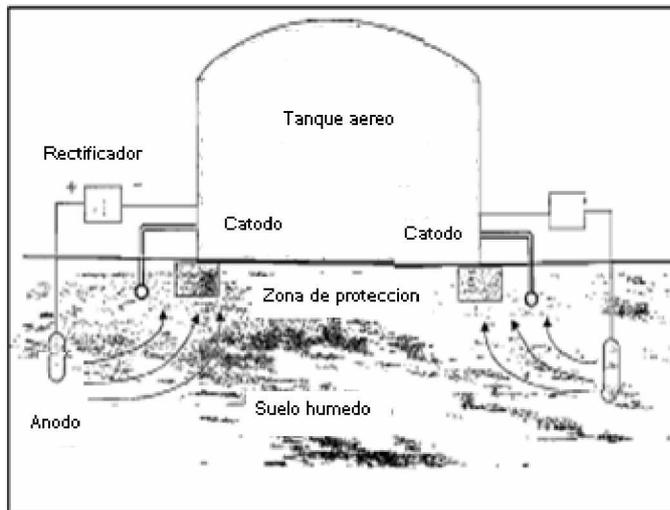
Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

Los suelos rectificadores convencionales tienen electrodos enterrados a profundidades cercanas a los 50 pies o menores e incluyen varios ánodos. Esto establece una distribución horizontal de la corriente. Los suelos rectificadores de gran profundidad son aquellos en los que se entierran los electrodos a profundidades de 250 a 300 pies, encajados en cajas de acero que se rellenan con materiales de baja resistencia. Esto facilita la circulación de las corrientes desde esta estructura hacia la que se protege.

Existen otras aplicaciones como los suelos distribuidos y los suelos horizontales continuos. Los primeros se ubican cerca de la superficie y de las estructuras que se protegen. Los ánodos pueden colocarse sin ninguna distribución geométrica determinada. En los suelos horizontales los ánodos se ubican en paralelo y cercanos a la estructura que se va a proteger. Este método se usa en ambientes de alta corrosión y donde existen estructuras capaces de influir o de causar interferencia en la protección de la estructura que

se protege. La figura 42 muestra la protección catódica de un tanque aéreo por medio de corriente impresa y ánodo de sacrificio.

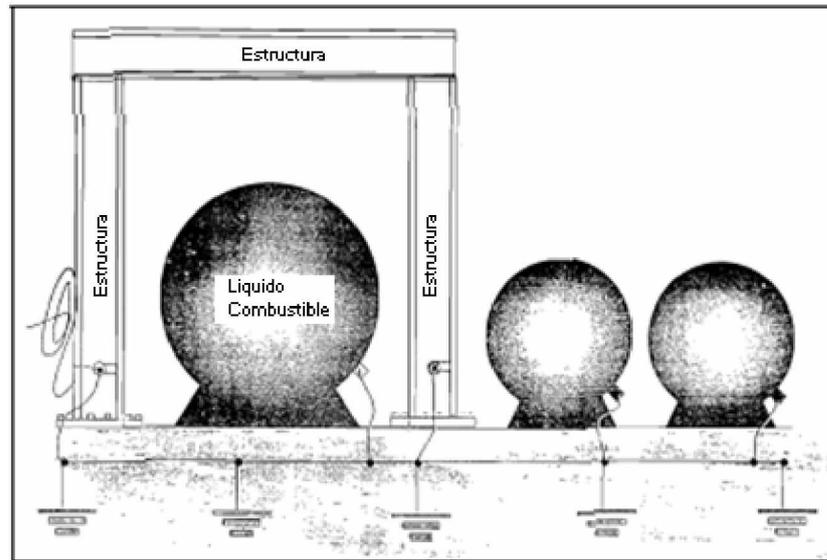
Figura 42. Protección de la base de un tanque



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

En la figura 43 se aprecia la forma correcta de una conexión a tierra para tanques con líquido de combustible.

Figura 43. Puesta a tierra con tanques con líquido de combustible



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

3.12 Rectificadores de pulso.

Estos equipos proporcionan protección catódica enviando pulsos a las superficies externas de las estructuras metálicas o tuberías. Al producir un pulso de alto voltaje y corta duración en forma repetitiva, se genera una protección uniforme que se extiende a lo largo de las tuberías. Además, se logra una mayor penetración que en el caso de los métodos convencionales de protección.

En la tubería, como se expuso antes, es típico conectar el negativo del rectificador a la estructura y el positivo al lecho de ánodos. Estos se entierran en posos profundos o huecos de poca profundidad o en zanjas cercanas a la estructura que se va a proteger.

La corriente de CD modera la corrosión reduciendo las moléculas de oxígeno corrosivo y los iones de hidrógeno que pueden estar presentes en el suelo que rodea a la superficie de la estructura. Al difundirse los iones y las moléculas adicionales desde el suelo hacia la superficie de la estructura metálica, se reduce el flujo de corriente directa.

Las moléculas de oxígeno corrosivo y los iones de hidrógeno adyacentes a la superficie del metal se reducen electroquímicamente en microsegundos después de aplicar la corriente catódica. Antes de que la reacción de corrosión comience de nuevo, iones y moléculas adicionales deben difundirse hacia la superficie de la estructura. El proceso de difusión es el más lento que el de reducción.

Con protección de pulso catódico, las moléculas y los iones se reducen electroquímicamente con pulsos de alto nivel pero de poca duración.

3.13 Tipos de ánodos.

En este método de protección se pueden utilizar ánodos consumibles y permanentes. Se consideran permanentes aquellos cuya pérdida de material es despreciable. Entre ellos se pueden listar: grafito, FeSi, PbAg, TiPt, TiMo (titanio mezcla de óxidos), los cerámicos, los de tántalo platinado, etc.

Entre los ánodos consumibles podemos mencionar el Fe y Al. Este tipo de ánodos se utilizan muy a menudo debido a su bajo costo y a que se pueden construir fácilmente.

En general los ánodos más utilizados son los permanentes. En instalaciones enterradas suele utilizarse el titanio con óxido metálico, el ferrosilicio o el grafito rodeados de un relleno especial.

Cuando los ánodos se sumergen se suele emplear titanio-platinado, tántalo-platinado, plomo-plata, plomo-platino, ferrosilicio o titanio, mezcla de óxidos. La tabla VII compara los tipos de ánodos para corriente impresa.

Tabla VII. Varios ánodos para corriente impresa

Características	Tipo de ánodo					
	Titanio, mezcla de óxidos	Ti/Pt	Grafito	Pb/Ag	Fe/Ag	Magnetita
Densidad (g/cm ³)	4-6	4-6	1-3	12	8	3-5
Densidad de corriente normal (mA/cm ²)	80-100	30-80	0.1-0.4	6-18	1-2	8-10
(mg/A año) ¹	4-5	6	250 × 10	68 × 10 ³	250 × 10 ³	1.5 × 10 ³

Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

3.14 Corrientes parásitas.

Las corrientes parásitas o corrientes de fuga se introducen en el suelo y provienen de fuentes diferentes; interfieren con el sistema de protección catódica y crean flujos de corriente en sistemas desprotegidos causando la corrosión.

En el caso de los equipos de corriente directa es necesario que se utilice un sistema de dos hilos, uno de ellos como trayectoria de retorno y que no se emplee la tierra o suelo para esta trayectoria.

Si existen varios sistemas de protección catódica en el área es necesario administrar en forma coordinada estos sistemas de distribución y su interconexión.

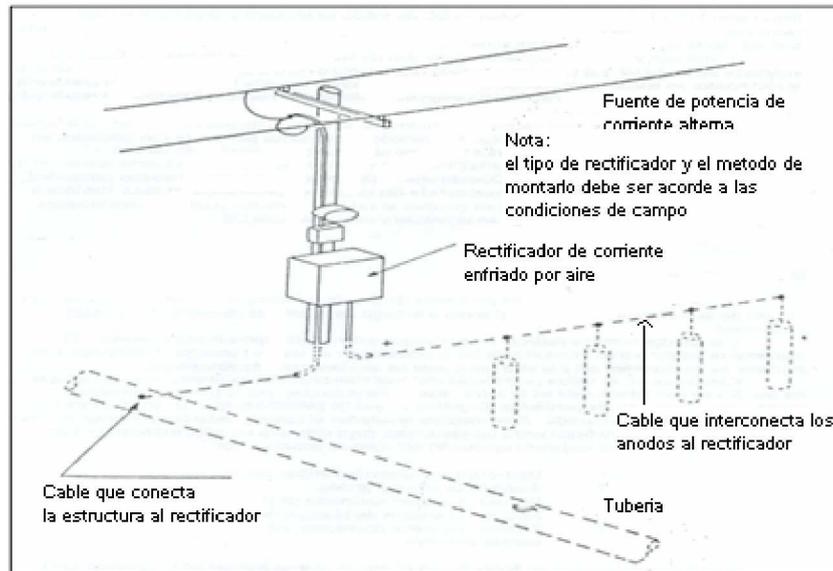
3.15 protección catódica utilizando voltaje impuesto.

En este tipo de protección, se utiliza un rectificador en donde un transformador reduce el voltaje de una corriente alterna AC, a un valor deseado y elementos rectificadores la convierten en corriente directa. El rectificador se conecta entre un ánodo auxiliar o grupo de ánodos y la estructura a proteger. De esta forma, se reduce un flujo de electrones hacia la estructura protegiéndola. En este proceso el ánodo o grupo de ánodos hechos de materiales como grafitos, carbón, zinc o estructuras opera adecuadamente, la corriente del rectificador contrarresta las corrientes que abandonan las áreas anódicas en la estructura.

Las principales ventajas de este método, en comparación con el de ánodos de sacrificio son: las estructuras con dimensiones muy grandes pueden ser protegidas, se pueden tener grandes suministros de corriente, el flujo de corriente puede ser controlado, las estructuras con o sin recubrimiento pueden protegerse.

Las desventajas son: costos en gastos de electricidad, e interferencia de corriente con estructuras vecinas. La figura 44 muestra la protección catódica utilizando el método de voltaje impuesto.

Figura 44. Protección catódica mediante voltaje impuesto



Fuente: Metodología para la protección de estructuras, cables y tubería subterránea considerando el efecto electroquímico de la corrosión galvánica.

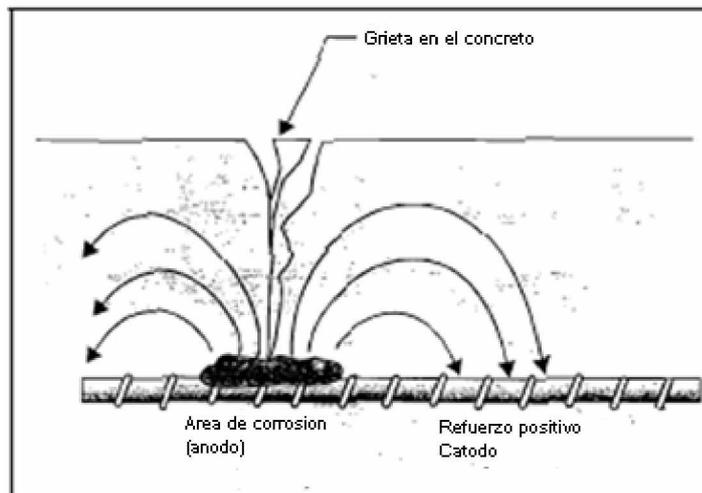
3.16 Causas del efecto catódico en los sistemas de puesta a tierra.

Cuando el concreto se aplica y se funde en una estructura se ofrece un ambiente sin riesgos para el acero. El concreto se convierte en un medio hostil cuando diferentes sustancias penetran en su interior y lo contaminan. Entonces se presenta la carbonización, es decir, cuando el dióxido de carbono penetra en el concreto reacciona la cal y baja el pH y se inicia el proceso de carbonización.

La corrosión del metal en el interior del concreto ocurre cuando se altera su estado pasivo. En construcciones nuevas el pH del concreto oscila entre 12 y 13. Este pH alto ofrece un ambiente protector mientras que las sales y la carbonización no cambien el estado pasivo.

Además, los iones de cloro que provienen del aire o de otra fuente se combinan con agua y oxígeno para crear un ambiente corrosivo. Entonces se establece una celda de corrosión electroquímica y comienza a deteriorarse el metal. Este hecho origina fuerzas expansivas en el concreto, lo que ocasiona grietas y fracturas. Esto continúa hasta que el concreto pierda su integridad estructural. Ver figura 45.

Figura 45. Corrosión en concreto contaminado



Fuente: Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

Si la malla y los electrodos están inmersos en la tierra los materiales del SPT pueden contraer corrosión debido a las celdas electroquímicas que se forman.

- **Celdas de corrosión con metales no similares.**

Este tipo de corrosión se conoce comúnmente como corrosión galvánica. Ocurre cuando dos metales de diferente composición hacen contacto en un mismo electrolito. La magnitud de la diferencia de potencial entre ambos metales y cual tenga el potencial negativo más alto determina que metal es el cátodo, cual es ánodo y a que rapidez ocurre la corrosión en el ánodo.

- **Celdas de corrosión electrolítica no similares.**

La corrosión de este tipo ocurre cuando en la celda o estructura se forma un electrolito de propiedades diferentes o variables. Es usual que el electrolito cambie de composición química o resistividad eléctrica.

Cuando ocurren variaciones de resistividad a lo largo de la estructura, normalmente en la superficie de la estructura en contacto con el suelo de más baja resistividad, se convierte en el área anódica.

El potencial eléctrico natural de un metal en un electrolito puede variar de una manera considerable debido a las diferencias de composición de este. El desarrollo de una diferencia de potencial, aún entre dos puntos de la misma estructura, puede proporcionar las condiciones necesarias para que ocurra la corrosión.

- **Celdas de corrosión por diferencia de oxígeno.**

Otra fuente importante de corrosión en una estructura es la diferencia de oxidación del electrolito (comúnmente el suelo). Cuando una parte de la

estructura se encuentra en el área del suelo con mayor suministro de oxígeno (buen suministro de aire) y la otra se ubica en el área mal oxigenada, la primera es el cátodo y la segunda el ánodo.

- **Celda de corrosión por estructuras viejas-nuevas.**

Este tipo de corrosión es muy similar a la que ocurre entre metales diferentes, en el sentido de que hay un potencial eléctrico entre ambos metales dentro de un mismo electrolito. Cuando es necesario realizar reparaciones o adiciones a una estructura se utilizan secciones nuevas del mismo tipo de metal.

Lo más significativo de este tipo de corrosión es que la nueva estructura normalmente se convierte en el ánodo. Al hablar de tuberías de oleoductos suele decirse que ya no se fabrican como antes sin reconocer la naturaleza de la corrosión a que están sometidas.

3.17 Mantenimiento a los sistemas de puesta a tierra de efecto catódico.

Además de que las estructuras metálicas se corroen, se generan fallas catastróficas que causan muertes y afectan el sistema ecológico. Muchos de estos daños pueden prevenirse aplicando efectivamente tecnologías adecuadas y estableciendo un buen programa de mantenimiento de las instalaciones ya existentes.

Las estructuras que requieren protección catódica son: sistemas de tuberías de transmisión y distribución, cables eléctricos enterrados bajo tierra, tanques enterrados y colocados sobre la superficie, estructuras marinas, equipo de puesta a tierra eléctrica, puentes de concreto con refuerzos de acero, etc. Un buen control de la corrosión requiere no solo un buen diseño sino también auditorías de los sistemas de protección contra la corrosión que incluyan el

examen de los sistemas existentes, la investigación de las áreas problemáticas y la instalación de sistemas de control y supervisión. Se pueden instalar sistemas de vigilancia para grandes tanques de almacenamiento, para sistemas en agua salada y para sistemas en la superficie o enterrados. Los sistemas de protección requieren:

- Auditorías de potencial.
- Auditorías de caída de potencial.
- Medidas de resistividad y resistencia del suelo.
- Medidas de pH del suelo.
- Auditorías para ubicar interferencias.

3.18 Consecuencias de malos diseños de los sistemas de puesta a tierra de efecto catódico.

Un mal diseño de puesta a tierra, provoca deterioro en la conexión, puede causar lesiones menores y hasta la muerte de una persona. Lo mismo que operaciones erráticas o daños costosos o irreparables a los equipos e instalaciones. Los errores en el sistema de puesta a tierra representan un peligro de seguridad industrial.

Un 80% de todos los problemas en las redes de distribución que afectan a los sensibles equipos electrónicos, los causa una mala conexión a tierra deficiente o incorrecta y problemas de cableado.

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA TANQUES DE COMBUSTIBLE

Los sistemas de protección catódica se diseñan e instalan para prevenir la corrosión en el fondo y en las paredes de los tanques. Los siguientes factores tienen influencia en la selección del sistema de protección catódica.

- Tamaño y número de tanques a proteger.
- Requerimientos de corriente.
- Condiciones del suelo, tales como: resistividad, composición química, ventilación y pH.
- Posibilidad de interferencia en la protección catódica por estructuras adyacentes.
- Ampliación o desarrollo a futuro del sistema de tanques de almacenamiento.
- Costo de instalación, operación y mantenimiento del sistema de protección catódica.
- Existencia o propuesta de sistemas de contención secundaria.

Entre las opciones disponibles para la protección de uno o más tanques, se incluyen:

1. Ánodos instalados a poca profundidad, alrededor de la periferia del tanque.
2. Ánodos instalados directamente debajo del tanque, antes de su construcción, que es lo más recomendable.
3. Horadar (agujerear) bajo el tanque en un pequeño ángulo para que los ánodos de sacrificio puedan distribuirse bajo el mismo para dar una adecuada protección.

4. Uso de un sistema por corriente impresa con cama de ánodos a profundidad.

Desde el punto de vista técnico y económico, un ánodo tiene que reunir una serie de propiedades y características esenciales las cuales son:

- Tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura (en el caso del acero a $-0,8$ V).
- Debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, es decir, no debe desarrollar películas pasivantes u obstructoras con los productos de corrosión y tener una fuerte de sobretensión de hidrógeno.
- El material debe tener un elevado rendimiento eléctrico en A/h Kg.
- El ánodo debe corroerse uniformemente.
- El metal debe ser de fácil adquisición ideal para poder fundirse en diferentes formas y tamaños.
- El metal debe tener un costo razonable, de modo que unido con otras características electroquímicas se pueda conseguir la protección a un costo razonable por amperio/año.

4.1 Secuencia de diseño.

A continuación se presentan los pasos a realizar para implementar un sistema de puesta a tierra de efecto catódico.

4.2 Selección de los elementos del sistema de puesta a tierra de efecto catódico para un tanque de combustible.

Para implementar un sistema de puesta a tierra de efecto catódico los elementos necesarios son los siguientes:

- Tanque de acero inoxidable.
- Ánodos de sacrificio.

- Puntos de toma de tierra y cajas de unión.
- Electrolito (suelo) y material de relleno.
- Junta de aislamiento.
- Electrodo de referencia.

4.3 Cálculo de la resistencia de un ánodo.

La fórmula para encontrar la resistencia de un ánodo de magnesio es la siguiente:

$$R_v = 0.00159 * \frac{\rho}{L} \left(2.3 * \log \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

R_v = Resistencia de un ánodo vertical a tierra, en Ω

ρ = Resistividad del suelo o material de relleno, en $\Omega\text{-m}$

L = Longitud del ánodo en m

d = Diámetro del ánodo en m

La resistencia del ánodo, depende de la resistividad del terreno, de la longitud y radio medio del ánodo. La resistividad del terreno se puede apreciar en la tabla IX.

4.4 Cálculo de la corriente de salida del ánodo.

La fórmula para encontrar la corriente de salida en función de voltajes de diseño y voltajes proporcionados por los fabricantes de ánodos, así como la resistencia del ánodo se presenta a continuación.

$$I = \frac{E_c - E_a}{R_a} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

I = Entrega de corriente del ánodo

E_c = Potencial mínimo de protección = -0.85 V

E_a = Potencial del ánodo a circuito abierto en V (ver tabla VIII)

$R_a = R_v$ = Resistencia del ánodo en Ω

Tabla VIII. Propiedades electroquímicas de ánodos de sacrificio

Metal anódico	Capacidad corriente teórica (A-año/kg)	Rendimiento (en porcentaje)	Potencial a circuito abierto (V)
Zinc (Zn)	0,094	95	-1.1 vs Cu/CuSO ₄
Aluminio (Al)	0,340	90	-1.03 vs Ag/AgCl
Magnesio (Mg)	0.251	50	-1.78 vs Cu/CuSO ₄

Fuente: NRF-047-PEMEX-2007.

4.5 Cálculo de la masa anódica total.

La fórmula para encontrar el total de la masa anódica es la siguiente:

$$v = \frac{C * P * R * U}{I} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

v = Vida del ánodo en años (12 años)

C = Capacidad de corriente en A-año/ Kg . (Ver tabla VIII)

P = Peso del ánodo en Kg

R = Rendimiento = 0.5 (Ver tabla VIII)

U = Factor de utilización del ánodo

I = Entrega de corriente del ánodo (ver tabla VIII)

$$P = \frac{I * v}{C * R * U} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Como se puede observar el total de la masa anódica depende de la corriente que entrega el ánodo, la vida útil en del diseño catódico, el rendimiento y el factor de utilización de los ánodos, la mayoría de estos datos los proporciona el fabricante.

4.6 Cálculo del número de ánodos

El cálculo para encontrar el número de ánodos a instalar se realiza con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{W}{W_A} \quad \text{Ecuación (14)}$$

N = Número de ánodos requeridos.

W_A = Peso de cada ánodo en Kg. (ver tabla IX)

W = Peso total de la masa anódica.

El número de ánodos depende del peso total de la masa anódica y del peso individual del ánodo (dato proporcionado por el fabricante).

En la tabla IX se muestra el número de ánodos de sacrificio a instalar de acuerdo al volumen del tanque y al medio corrosivo en que se encuentra. Se debe tener presente en el diseño las fórmulas antes mencionadas y verificar los resultados con la tabla IX.

Tabla IX. Número de ánodos de 4.1Kg de aleación y alto potencial

Tanque Volumen	Tipo de suelo	N ^o de ánodos
2,250 L	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	1
	Suelos con piedra o muy secos.	1
4,500 L (4.5 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	1
	Suelos con piedra o muy secos.	2
6,430 L (6.43 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	2
	Suelos con piedra o muy secos.	3
10,000 L (10 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	3
	Suelos con piedra o muy secos.	4
16,050 L (16.05 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	5
	Suelos con piedra o muy secos.	7
19,070 L (19.07 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	5
	Suelos con piedra o muy secos.	7
20,000 L (20 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	5
	Suelos con piedra o muy secos.	7
30,000 L (30 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	6
	Suelos con piedra o muy secos	8
40,000 L (40 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	7
	Suelos con piedra o muy secos.	9
50,000 L (50 m ³)	Suelos de resistividad media o baja (arenas, arcillas, tierra vegetal, etc, es decir sin muchas piedras).	8
	Suelos con piedra o muy secos.	10

Fuente: WWIPROCAT, S.L.

4.7 Cálculo del espaciamiento entre ánodos.

Para encontrar la separación entre los ánodos a instalar se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \frac{L}{N} \qquad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

S = Espaciamiento en m

L = Longitud de la estructura a proteger

N = Número de ánodos requeridos

La distancia entre ánodos depende de la longitud de la estructura a proteger, y se debe respetar 5 m de longitud como mínimo entre cada ánodo.

4.8 Características técnicas de los elementos de puesta a tierra de efecto catódico.

De acuerdo a la magnitud del diseño del sistema de puesta a tierra, al electrolito (suelo), y a las condiciones ambientales en donde se construye el sistema de puesta a tierra de efecto catódico, se seleccionan las características técnicas del equipo.

4.9 Características técnicas de ánodos de magnesio.

Los Ánodos de Magnesio de alto potencial suministran protección a bajo costo, convirtiéndose en el sistema de protección catódica más económico.

Características:

- Potencial de circuito abierto con respecto al electrodo de referencia $Cu/CuSO_4 = -1.78V$.
- Rendimiento = 50%.
- Capacidad de corriente teórica = 0.251 A-año/Kg.
- Capacidad de corriente real 1.100 – 1200 A-H/Kg.
- Existe gran variedad de tamaños y pesos.
- Este tipo de ánodos se adapta a cualquier tipo de terreno.

Existen dos aleaciones, una llamada AZ-53 y la otra HP. La primera tiene un potencial, en circuito libre, de -1.55 V y la segunda de -1.78 V respecto al electrodo de referencia. $Cu/CuSO_4$.

4.10 Características técnicas de electrodos de referencia.

Son electrodos de referencia de $Cu/CuSO_4$ con una solución saturada de $CuSO_4$ químicamente pura para ser instalado de forma permanente en una toma de potencial donde se quiere que el electrodo esté muy próximo a la estructura cuyo potencial se pretende medir.

Características:

- El electrodo consiste en un barra de cobre electrolíticamente puro.
- El electrodo y la solución saturada de $CuSO_4$ están dentro de un vaso de cerámica porosa impregnada con sulfato de cobre.
- El cable del electrodo es de calibre 10 AWG. La soldadura entre el cable y el electrodo se protege con una resina especial resistente a altas temperaturas y un gran aislamiento eléctrico.

- El error máximo permitido en pruebas a 20 °C es ± 10 mV con respecto a un electrodo de referencia patrón de $Cu/CuSO_4$.
- La temperatura de trabajo oscila en el rango de -10 a 60 °C.

4.11 Características técnicas de tomas de potencial.

Normalmente son cajas de unión y sirven para el monitoreo de diferentes parámetros relativos a la protección catódica de un sistema.

Características:

- Las cajas están fabricadas con materiales especiales fabricadas con moldes MT con yelt coat alisofatico, que las protege de la luz solar y ambientes agresivos.
- El peso por caja es de 3.5 Kg.
- Los tornillos y bisagras son de acero inoxidable.
- Soportan hasta 80 °C. de temperatura.

4.12 Características técnicas de juntas de aislamiento.

Se construyen con un material aislante eléctrico, que se intercala en el sistema de tubería para separar eléctricamente a la estructura por proteger del resto del sistema.

Se aplica principalmente para la separación de dos tramos distintos de tubería enterrada, si van a llevar protección catódica distinta, o una va a llevar protección catódica y la otra no. También si la tubería se une con válvulas y bombas, que estén en contacto con el suelo directamente o cuando entran en contacto con todas las estructuras metálicas de una planta a través del sistema de tierras.

Estas juntas aislantes son de una rigidez dieléctrica (3 KV mínimo) y aislamientos altos, son seguras para tuberías y tanques que almacenan líquidos o gases inflamables.

Los dispositivos de aislamiento, consistentes en bridas, juntas aislantes prefabricadas, juntas monolíticas o acoplamientos, son necesarios para facilitar la aplicación del control de corrosión. Estos dispositivos deben seleccionarse para temperatura, presión y aislamiento eléctrico correcto.

4.13 Electrolito y material de relleno

Se refiere al suelo o subsuelo en contacto con una estructura metálica enterrada. Normalmente el suelo se trata con materiales de relleno (químicos para bajar la resistividad).

El material de relleno es una mezcla de materiales sólidos que envuelven al ánodo para incrementar su conductividad eléctrica en el terreno donde se alojan.

Si el relleno se instala adecuadamente, de manera que no se forme vacío alrededor del ánodo, la mayor parte de la corriente que alcanza este, es conducida al relleno por contacto eléctrico.

Para ánodos de sacrificio se utiliza como material de relleno la composición que se indica en la tabla X.

Tabla X. Porcentaje de peso del material y cantidad de relleno por ánodo

MATERIAL	PESO EN %
Yeso seco en polvo	75
Bentonita seca en polvo	20
Sulfato de sodio anhidro	5
Agua para saturar la mezcla	
Cantidad de relleno por ánodo	
Peso del ánodo Kg (lb)	cantidad de relleno Kg (lb)
7.71 (17)	13.61 (30)
14.51 (32)	15.88 (35)
21.77 (48)	23.58 (52)

Fuente: NRF-017-PEMEX-2001.

4.14 Ejemplo de diseño.

Se debe instalar un sistema de protección catódica para un tanque de forma cilíndrica de 10,000 litros de combustible, el tanque es de acero y la altura es de 3m. El tanque está sobre la superficie del terreno, la resistividad del terreno es $1000 \Omega \cdot m^2$. Se sabe por datos del fabricante que los ánodos a utilizar tienen las medidas de 0.8143 m de longitud, y 0.1016 m de radio medio, además, los ánodos son fabricados de magnesio de 4.1 Kg, y la temperatura ambiente del lugar oscila en 22 °C.

Calcular:

- La masa total anódica.
- La cantidad de ánodos de magnesio a instalar.
- La corriente de salida de cada ánodo.

Solución:

Cálculo de la resistencia de un ánodo.

$$R_v = 0.00159 * \frac{\rho}{L} \left(2.3 * \log \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$R_v = 0.00159 * \frac{1000 \Omega \cdot m}{0.8143 m} \left(2.3 * \log \frac{8(0.8143 m)}{0.1016 m} - 1 \right)$$

$$R_v = 6.16250 \Omega.$$

Cálculo de corriente de salida del ánodo.

$$I = \frac{E_c - E_a}{R_a} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$I = \frac{-0.850 V - (-1.78 V)}{6.16250 \Omega}$$

$$I = 0.15092 A$$

Peso total de la masa anódica

$$v = \frac{C * P * R * U}{I} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$P = \frac{I * v}{C * R * U} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$P = \frac{0.15092 A * 12 \text{ años}}{0.251 A \cdot \text{años} / Kg * 0.5 * 0.85}$$

$$P = 16.97 Kg.$$

Cálculo del número de ánodos

$$N = \frac{W}{W_A} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$N = \frac{16.97 \text{ Kg}}{4.1 \text{ Kg}} = 4.14 \approx 4 \text{ ánodos.}$$

Espaciamiento entre ánodos.

$$S = \frac{L}{N} \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$S = \frac{3 \text{ m}}{4 \text{ ánodos}}$$

$$S = 0.75 \text{ m/ánodo}$$

Nota: La distancia entre la estructura y los ánodos no debe ser mayor de 50 m.

4.15 Costo total del proyecto.

La siguiente tabla muestra los valores finales de diseño de los elementos a utilizar en el diseño catódico para un tanque de 10,000 litros de combustible.

Tabla XI. Valores finales de diseño

CANTIDAD	MATERIAL	PRECIO
1	Tanque de acero	40,000.00
4	Ánodos de magnesio de alto potencial	7,000.00
1	Electrodo de referencia	3,000.00
4	Cajas de toma de potencial	3,000.00
6	Juntas de aislamiento	3,000.00
226.79 Kg.	Material de relleno	2,000.00
	Mano de obra	10,000.00
	Costo total	68,000.00

4.16 Justificación económica.

El costo total, producto de diseñar e implementar un sistema de protección catódica, para un tanque de combustible con un volumen de 10,000 litros y un terreno muy seco, incluyendo mano de obra es: 68,000.00 quetzales.

La inversión es fuerte, sin embargo el sistema de protección garantiza, vida útil por un lapso de tiempo de 12 años.

La inversión se justifica porque minimiza los gastos por mantenimiento correctivo, dando paso a mantenimientos rutinarios (mantenimientos predictivos) los cuales se realizan por lo menos una vez al año, a partir del tercer año de iniciado la protección catódica.

El cambio de ánodos se realiza cuando el porcentaje de corriente de salida disminuya del 100 al 15%. Esto garantiza la efectividad de la protección,

el deterioro de los ánodos varía de acuerdo a los cambios que sufre el electrolito, (temperatura, salinidad, pH, humedad, etc.) aproximadamente el cambio de los primeros ánodos se realiza en 12 años.

Si comparamos el precio y el buen estado en que se mantiene el tanque de acero durante la vida útil del diseño, contra los gastos de renovación de ánodos de magnesio, es factible invertir y ahorrar dinero en gastos de mantenimientos correctivos al sistema a mediano y largo plazo. De ahí la importancia de implementar diseños catódicos en los tanques de combustible.

CONCLUSIONES

1. Los métodos más efectivos en la protección catódica (ánodos de sacrificio y corriente impresa) nos permiten evaluar estudiar y corregir el fenómeno catódico en estructuras y tanques metálicos enterrados, minimizando la corrosión.
2. La diferencia de potencial que se genera en una celda electrolítica, debido a dos metales diferentes provoca la pérdida de libras de peso del metal (ánodo respecto al cátodo), cuanto mayor cantidad de diferencia de potencial exista entre los metales, mayor y más acelerada es la corrosión.
3. Los terrenos con alto grado de salinidad y alto pH son los más propensos a presentar la corrosión, debido a la fácil formación de celdas galvánicas.
4. La protección catódica no es una ciencia exacta; los cálculos se basan en una densidad de corriente que ha demostrado ser correcta en un área particular o bajo condiciones específicas. Diseñar correctamente los ánodos reduce gastos por deterioro parcial o total de los tanques de combustible y otras estructuras enterradas en el suelo.
5. El diseño óptimo de la protección catódica, evita gastos innecesarios en mantenimientos correctivos a las estructuras a proteger. Si se aplica la renovación de los ánodos de sacrificio en el momento preciso, las estructuras permanecen en buen estado, justificando la inversión económica del diseño.

RECOMENDACIONES

1. No pintar los ánodos.
2. Los ánodos deben verificarse, mediante la toma de potenciales con un electrodo de referencia, y comparar periódicamente el comportamiento durante su tiempo de vida.
3. Utilizar el potencial de -0.85 voltios para protección del acero con respecto al electrodo de referencia $Cu / CuSO_4$.
4. Los ánodos de magnesio son seguros, existen en variedad de tamaños, son económicos y se adaptan a todo tipo de terreno.
5. La protección catódica puede extenderse a estructuras con ambientes muy corrosivos. (Ambientes marítimos)
6. Utilizar protección catódica por el método de corriente impresa garantiza vida útil indefinidamente sobre la estructura a proteger.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB Power Systems, Inc., Electrical transmission and distribution reference book, 4th Edition, 12th printing, 1964.
2. Abledu, K. O., and Laird, D. N., "Measurement of substation rock resistivity," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 295–300, Jan. 1992.
3. AIEE Working Group on Substation Grounding Practices, "Application guide on methods of substation grounding," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, no. 11, pp. 271–278, Apr. 1954.
4. A. Jones, Denny "Principios y prevención de la corrosión".
5. Armstrong, H. R., "Grounding electrode characteristics from model tests," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1301–1306, Dec. 1953.
6. Armstrong, H. R., and Simpkin, L. J., "Grounding electrode potential gradients from model tests," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 618–623, Oct. 1960.
7. Blattner, C. J., "Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3603–3608, Dec. 1985.

8. Blattner, C. J., "Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1758–1763, Sept./Oct., 1980.
9. Blattner, C. J., "Study of driven ground rods and four point soil resistivity data," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 101, no. 8, pp. 2837–2850, Aug. 1982.
10. Blattner, C. J., and Dawalibi, F., "Earth resistivity measurement interpretation techniques," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems," vol. PAS 103, no. 2, pp. 374–382, Feb. 1984.
11. Bodier, M. G., "Systematic investigation of potential gradients in and around a transformation substation," Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, July 1951.
12. Bogajewski, W., Dawalibi, F., Gervais, Y., and Mukhedkar, D., "Effects of sustained ground fault current on concrete poles," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2686–2693, Aug. 1982.
13. Conversion Subcommittee of AIEE Substations Committee, "Recommended grounding practices for single polarity DC structures," Paper no. 57-719, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 76, part III, 1957.
14. Curdts, E. B. "Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements," AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Part I, vol. 77, pp. 767–770, Nov. 1958.

15. Dawalibi, F. P. and Mukhedkar, D. "Ground electrode resistance measurements in non-uniform soils," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no.1, pp. 109–116, Jan. 1974.
16. Dawalibi F. P. and Mukhedkar, D. "Resistance measurement of large grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2348–2354, Nov./Dec. 1979.
17. Dawalibi, F. P., Ma, J., and Southey, R. D., "Equivalence of uniform and two-layer soils to multilayer soils in the analysis of grounding systems," IEE Proceedings—Generation, Transmission, Distribution, vol. 143, no. 1, pp. 49–55, Jan. 1996.
18. Dawalibi, F., Mukhedkar, D., and Bensted, D., "Soil effects on ground fault currents," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 3442, July 1982.
19. Díaz, Pablo. "SOLUCIONES PRÁCTICAS para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución" McGraw Hill Interamericana editores, S.A.
20. Estándar ASTM G 97-88 (1995) Método de prueba estándar para muestra y evaluación de laboratorio de ánodos de sacrificio de magnesio para aplicaciones bajo tierra. "Standard test method for laboratory evaluation of magnesium sacrificial anode test specimens for underground applications"

21. Fagan, E. J., and Lee, R. H., "The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA-6, no. 4, pp. 337–348, July/Aug. 1970.
22. Garrett, D. L., "Determination of maximum ground fault current through substation grounding system considering effects of static wires and feeder neutrals," Proceedings of Southeastern Electric Exchange, Atlanta, Ga., 1981.
23. Hammond, E., and Robson, T. D., "Comparison of electrical properties of various cements and concretes," The Engineer, 199, no. 5165, pp. 78–80, Jan. 1955.
24. IEEE Tutorial Course 86 EH0253-5-PWR, "Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety, Chapter 2, (Soil Resistivity Analysis)."
25. Inspección, reparación, modificación y reconstrucción de tanques de almacenamiento, API Estándar 653 Primera edición, enero 1991 "Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction API Standard 653 First edition, January 1991"
26. Jones, W. R., "Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils," IEEE Transactions on Power Apparatus, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1343–1346, July/Aug. 1980.
27. Kemal Nisancioglu. «Cathodic Protection». Rev. Material Performance, diciembre, 1984.

28. La protección catódica y sus aplicaciones. Corrosión y Protección, vol. 1, N.º 1, 1988.
29. Manual on ground resistance testing, Publication no. 25-J, James G. Biddle Co., 1970.
30. Miller, Hart, and Brown, "Stray current and galvanic corrosion of reinforced steel in concrete," Material Performance, vol. 15, no. 5, pp. 20–27, May 1976.
31. Moore, R., "An empirical method of interpretation of earth resistivity measurements," American Institute of Mining Engineering, Column 164, pp. 197–231, 1945.
32. Mukhedkar, D., Gervais, Y., and Dejean, J. P., "Modeling a grounding electrode," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-92, no. 1, pp. 295–297, Jan. 1973.
33. NACE RP-0572-95 Prácticas de estándares recomendados para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de corriente impresa en encamados profundos. "Standard recommended practice, design, installation, operation, and maintenance of impressed current deep groundbeds"
34. NACE RP-0388-95 Protección catódica de corriente impresa de superficies internas sumergidas en tanques de acero para almacenamiento de agua, apartado no. 21040 "Impressed current cathodic protection of internal submerged surfaces of steel water storage tanks, item no. 21040"

- 35.NACE RP-0575-95 Sistemas de protección catódica interna en recipientes para tratamiento de aceite, apartado no. 21015 “Internal cathodic protection systems in oil treating vessels item no. 21015”
- 36.NACE 10A 190 Técnicas de medición relativas a criterios de protección catódica para sistemas de tubería de acero enterrados. “Measurement techniques related to criteria for cathodic protection of underground submerged steel piping systems”.
- 37.NACE RP-0169-96 Prácticas de estándares recomendados para el control de la corrosión externa de sistemas de tubería metálica sumergida o enterrada.
- 38.Nahman, J. M., and Salamon, D., “A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 3, no. 4, pp. 1375–1379, Oct. 1988.
- 39.Norma No. 3.413.01 de Petróleos Mexicanos.
- 40.Norma NMX-K-109-1977 “Ánodos de magnesio empleados en protección catódica”
- 41.Normas para construcción de obras.
- 42.Norma para proyecto de obras “Sistemas de protección catódica”, No. 2.413.01.

43. Orellana, E., and Mooney, H. M., "Two and three layer master curves and auxiliary point diagrams for vertical electrical sounding using Wenner arrangement," Interciencia, Madrid, Spain, 1972.
44. Protección Catódica con ánodos galvánicos. <http://lectura.ilce.edu.mx>.
45. Protección catódica para tanques de almacenamiento instalados sobre el terreno "Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks" API práctica recomendada 651 Segunda edición, Diciembre 1997
46. Protección contra fuentes de ignición que provienen de estática, de alumbrado y presencia de corriente API RP Z003.
47. Reichman, J., Vainberg, M., and Kuffel, J., "Short-circuit capacity of temporary grounding cables," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 260–271, Jan. 1989.
48. Roman, I., "Some interpretations of earth resistivity data," American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, vol. 110, pp. 183–200, 1934
49. Rosa, E. B., McCollum, B., and Peters, O. S., "Electrolysis in concrete," Department of Commerce, Technical Paper of Bureau of Standards, no. 18, pp. 1–137, Mar. 1913.
50. Rüdénberg, R., "Grounding principles and practices—Part 1, Fundamental considerations on grounding currents," Electrical Engineering, vol. 64, no. 1, pp. 1–13, Jan. 1945.

51. Schwarz, S. J., "Analytical expression for resistance of grounding systems," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 73, no. 13, part III-B, pp. 1011–1016, Aug. 1954.
52. Stommen, Roe. «Anode Resistance». Rev. Material Performance, Marzo, 1985.
53. "Standard recommended practice, control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems"
54. Sunde, E. D., Earth conduction effects in transmission systems, New York: McMillan, 1968.
55. Sverak, J. G., "Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid; Part I—How good is the present IEEE method?" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp. 7–25, Jan. 1984.
56. Sverak, J. G., "Sizing of ground conductors against fusing," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 100, no. 1, pp. 51–59, Jan. 1981.
57. Tagg, G. F., "Interpretation of resistivity measurements," American Institute of Mining and Metallurgical Engineering Transactions, vol. 110, pp. 135–147, 1934.

58. Tagg, G. F., "Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering large area," Proceedings of IEE, vol. 111, no. 12, pp. 2118–2130, 1974.
59. Tagg, G. F., "Measurement of the resistance of an earth-electrode system covering large area," Proceedings of IEE, vol. 116, no. 3, pp. 475–479, Mar. 1969.
60. Tagg, G. F., "Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems," Proceedings of IEE, vol. 117, no. 11, pp. 2185–2190, Nov. 1970.
61. Thapar, B., and Gerez, V., "Equivalent resistivity of non-uniform soil for grounding design," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 759–767, Apr. 1995.
62. Thapar, B., Gerez, V., and Kejriwal, H., "Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 360–368, Jan. 1994.
63. The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, Sixth Edition.
64. Thompson, P., "Resistivity tests on electric station ground coverings," Internal Report, Los Angeles Department of Water and Power, July 12, 1983.
65. Thompson, P., "Resistivity tests on soil and concrete," Internal Report, Los Angeles Department of Water and Power, Aug. 8, 1977.

66. Wenner, F., "A method of measuring earth resistances," Bulletin of the Bureau of Standards, Report no 258, vol. 12, no. 3, pp. 469–482, Feb. 1916.

67. Wilson Walton Internacional de Venezuela. "Corrosión y Protección Catódica".

ANEXOS

Tabla XII. Propiedades de los ánodos de sacrificio

	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de Aluminio	Ánodo de Aluminio	Ánodo de Aluminio
Propiedad	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	TIPO A	TIPO B	TIPO C
Composicion %	Cd = 0.025 - 0.15 Al = 0.10 - 0.50 Fe = 0.005 Max Pb = 0.006 Max Cu = 0.005 Max Si = 0.125 Max	Cu = 0.1Max Al = 5 - 7 Si = 0.3 Max Fe = 0.003 Max Mn = 0.15 Min Ni = 0.003 Max Zn = 2 - 4 Otros = 0.3 Max	Si = 0.11 - 0.21 Fe = 0.10 Max Zn = 0.3 - 0.5 Sn = ----- Mg = ----- Hg = 0.02 - 0.05 In = ----- Cu = 0.006 Max Otros = 0.02 Max	Si = 0.10 Max Fe = 0.13 Max Zn = 3.5 - 5.0 Sn = ----- Mg = 0.3 - 0.8 Hg = ----- In = 0.02 - 0.05 Cu = 0.006 Max Otros = 0.02 Max	0.10 Max Fe = 0.13 Max Zn = 4 - 5 Sn = 0.08 - 0.16 Mg = ----- Hg = ----- In = ----- Cu = 0.01 Max Otros = 0.02 Max
Rendimiento	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de Trabajo mV Vs. Ag / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs. Acero protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad eléctrica teórica A-h/ Kg. (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1190)	2700 (1231)	Variable
Capacidad eléctrica real A-h/ Kg. (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2889 (1228)	2430 (1110)	Variable
Consumo ánodo Kg. / A-año Lb / A-año	11.00 23.8	8.00 17.5	3.00 6.8	10.00 21.9	5.50 12

Fuente: Revista del instituto de investigación FIGMMG Vol. 7, N.º 13, 37-44.

Tabla XIII. Factor f de daño por tipo de recubrimiento

Tipo de recubrimiento	Vida de diseño en años		
	10	20	30
Epóxico adherido por fusión	0,01	0,04	0,09
Epóxico líquido	0,03	0,1	0,3
Tricapa Epoxico-Polietileno	0,001	0,004	0,009
Tricapa Epoxico-Polipropileno	0,001	0,004	0,009
Otros	0,03	0,1	0,3

Fuente: NRF-047-PEMEX-2007.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por ser mi fuente inagotable de sabiduría y quien ha guiado mi vida hasta este momento.
- Virgen María** Por haberme dado fuerzas en los momentos de necesidad, soledad y angustia.
- Mis padres** José Luis Ché Ortiz y Petronila Socoy, por su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, con todo mi amor.
- Mis hermanos** María Teresa, María Concepción, Luis Rolando, Rosa Isabel, por sus consejos y amistad que hemos compartido.
- Mis abuelos** Con admiración y respeto.
- Mis amigos** Por demostrarme que puedo contar con ellos.
- Mi asesor** Ing. Otto Fernando Andrino González
Gratitud sincera por todo el apoyo brindado.
- Los ingenieros** Omar Salvatierra y Donal Velásquez, gracias por todo el apoyo.
- Toda mi familia** Respetuosamente.