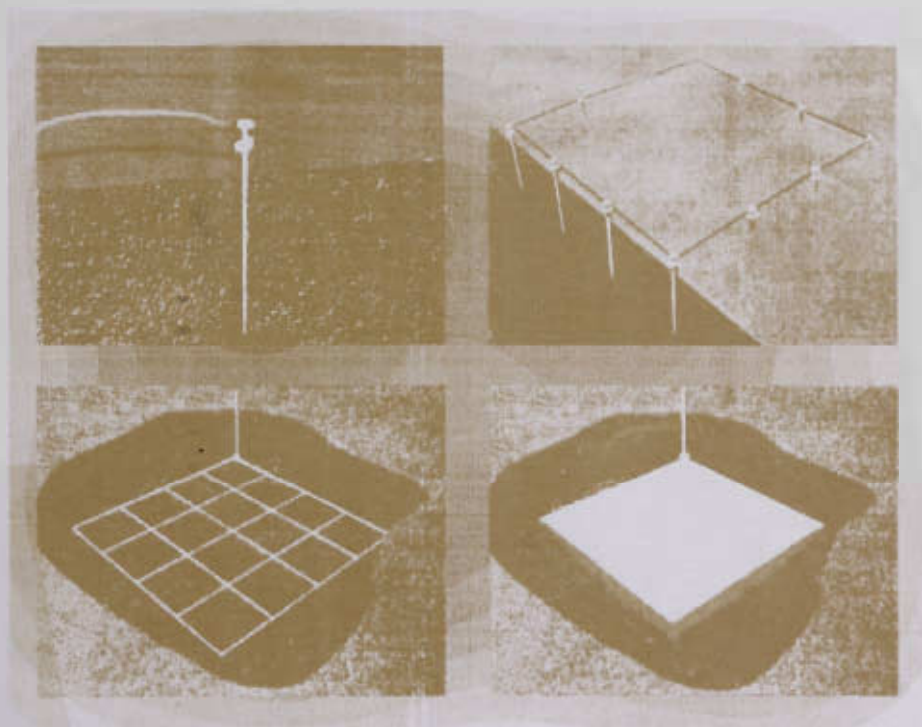


TIERRA FÍSICA

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

ELADIO CARDIEL PÉREZ
PABLO ROGELIO HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



TIERRA FÍSICA

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

TIERRA FÍSICA
SISTEMAS DE PUERTA A TIERRA

Este material fue dictaminado y aprobado por el Consejo Editorial de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, el 29 de noviembre del 2000.

217513

C.B. 2893105

TIERRA

FÍSICA

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

ELADIO CARDIEL PÉREZ
PABLO ROGELIO HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



AZCAPOTZALCO

COSE: BIBLIOTECA

2893105



División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Departamento de Electrónica

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

RECTOR
DR. ADRIÁN GERARDO DE GARAY SÁNCHEZ

SECRETARIA
DRA. SYLVIE JEANNE TURPIN MARION

COORDINADORA GENERAL DE DESARROLLO ACADÉMICO
DRA. NORMA RONDERO LÓPEZ

COORDINADOR DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA
D. I. JORGE ARMANDO MORALES ACEVES

JEFE DE LA SECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN EDITORIALES
LIC. FRANCISCO JAVIER RAMÍREZ TREVIÑO

CORRECCIÓN:
MARISELA JUÁREZ CAPISTRÁN
PORTADA Y PRELIMINARES:
DCG HUGO ADRIÁN ÁBREGO GARCÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO
AV. SAN PABLO 180
COL. REYNOSA TAMAULIPAS
DEL. AZCAPOTZALCO
C. P. 02200
MÉXICO, D. F.

© UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

ELADIO CARDIEL PÉREZ
PABLO ROGELIO HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

TIERRA FÍSICA. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
ISBN: 970-654-847-5

1ª. EDICIÓN, 2001
1ª. REIMPRESIÓN, 2006
2ª. REIMPRESIÓN, 2009

IMPRESO EN MÉXICO

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1. La seguridad del usuario	3
Capítulo 2. Ruido y otras señales de Interferencia	5
Capítulo 3. Puesta a tierra del sistema eléctrico	7
Capítulo 4. Puesta a tierra de equipos no eléctricos	9
Capítulo 5. Importancia de los sistemas de tierra	11
Capítulo 6. Características de las tierras	13
Capítulo 7. Cálculo de sistemas de tierra	23
Capítulo 8. Medición de la resistencia de tierra y de la resistividad del terreno	27
Capítulo 9. Mejoramiento de la resistencia de tierra	31
Capítulo 10. Tipos y sistemas de electrodos	35
Capítulo 11. Conexión de los electrodos al sistema de tierra	37
Capítulo 12. Tipos de barras comerciales	39
Capítulo 13. Procedimiento práctico para la implementación de un sistema de puesta a tierra	41
Capítulo 14. Recomendaciones para la puesta a tierra de un sistema eléctrico	47
Conclusiones	49
Apéndice	51
Referencias	61

INTRODUCCIÓN

El concepto **tierra** (*GROUND* en instrumentación) se define como una conexión conductora a través de la cual, un circuito, equipo u objeto en general se pone en contacto con el suelo (planeta tierra). Esta conexión tiene como objetivo mantener el potencial de tierra tan cerca como sea posible en el circuito o equipo conectado a ella con la finalidad de evitar diferencias de potencial y por ende limitar drásticamente una posible circulación de corriente eléctrica. Comúnmente a esta situación se le llama puesta a tierra.

La Norma Eléctrica Americana (National Electric Code, NEC por sus siglas en ingles) define a la tierra como "Una conexión conductora, intencional o accidental entre un circuito eléctrico o equipo y la tierra, o hacia un cuerpo conductor que actúa en lugar de la tierra."

Cuando se habla del sistema de tierra, realmente se habla de dos aspectos, la conexión a tierra y el aterrizaje del equipo. El aterrizaje de tierra es una conexión intencional desde un circuito conductor, usualmente el neutro al electrodo de tierra colocado en la tierra. Por otro lado el aterrizaje del equipo es para asegurar que el equipo que opera dentro de una estructura este apropiadamente aterrizado. Estos dos sistemas de tierra deben estar unidos para prevenir diferencias de potencial. El propósito de un sistema de tierra aparte de la protección a personas, plantas industriales y equipo eléctrico/electrónico es proveer un paso seguro para la disipación de corrientes de falla, rayos generados en tormentas eléctricas, descargas estáticas, interferencia electromagnética, señales de radiofrecuencia e interferencia en general.

La "**tierra**" tiene varias aplicaciones de protección para fenómenos naturales, se encarga de liberar grandes zonas de carga eléctrica acumulada, y así evitar que se produzcan los famosos **rayos**.

Para potenciales externos debidos a fallas en el sistema eléctrico de potencia con retorno de tierra, ayuda a que entren en operación rápidamente los relevadores de protección en virtud de que ofrece un camino de muy baja impedancia a la corriente de falla y de esta forma evitar daño en equipos e intalaciones.

Idealmente, es útil para mantener una referencia segura en instrumentación, protege contra la electricidad estática y limita al sistema para operar dentro de los márgenes de seguridad requeridos. Todo lo anterior sugiere que la resistencia del

sistema de tierra debiera ser cero ohms, sin embargo, por lo que describimos más adelante, este valor no puede ser obtenido en la práctica.

Los aparatos que normalmente están expuestos al contacto del usuario no deberán tener partes energizadas, excepto tostadores, asadores u otros aparatos, los cuales por requerimiento de alta temperatura, manejan partes expuestas por las que se conduce corriente eléctrica.

Capítulo 1

LA SEGURIDAD DEL USUARIO

Una de las principales causas de accidentes cuando se manejan equipos electrodomésticos e instrumentos electrónicos lo representa el hecho de no contar con un adecuado sistema de tierra física de tal forma que cuando el cuerpo humano forma parte de un circuito, es decir, que la corriente entra en algún punto de una persona y lo abandona en otro, la probabilidad de una desgracia es muy alta. La magnitud de dicha corriente depende de la diferencia de potencial y de la resistencia que en ese momento presente el cuerpo en el circuito mencionado.

Son fundamentalmente tres efectos los que se generan cuando fluye corriente a través del tejido humano:

1. Calentamiento resistido del tejido
2. Estimulación eléctrica de tejidos excitables
3. Quemaduras graves

Por la importancia que reviste la seguridad en el manejo de equipo eléctrico-electrónico y su relación con la tierra física, a continuación se mencionarán algunos aspectos en torno a esta situación:

Cuando circula una corriente suficiente para excitar las terminales nerviosas de la piel, el individuo sufre una sensación de cosquilleo, existe un concepto denominado umbral de percepción que es la mínima corriente que un individuo puede detectar y este umbral suele estar entre 1 y 10mA para la mayoría de las personas.

Para niveles más altos de corriente, nervios y músculos son vigorosamente estimulados lo que puede resultar eventualmente en dolor y fatiga. Estas contracciones involuntarias se manifiestan con corrientes un poco por arriba de 10mA. Corrientes ligeramente superiores a 15mA ya pueden causar contracción involuntaria de los músculos respiratorios al grado de generar asfixia si no se interrumpen inmediatamente.

En las áreas en donde se tienen pacientes en estado crítico (unidades de cuidados intensivos) al igual que en sitios para practicar anestesia, un ingrediente importante para la seguridad de las personas contra descargas y electrocuciones lo representa el sistema de tierra.

Las situaciones descritas en párrafos anteriores aplican cuando la corriente no circula directamente a través del corazón.

El corazón merece una mención especial en virtud de lo susceptible que resulta respecto de la corriente eléctrica. Bastan alrededor de 15 uA [5] para provocar fibrilación ventricular (pérdida de sincronía en las fases de contracción del músculo cardíaco y por consecuencia cese de bombeo de sangre) pudiendo llegar a provocar la muerte si no se asiste rápidamente mediante la técnica RCP (Resucitación Cardio-Pulmonar) y el apoyo de un desfibrilador.

Por norma todo equipo, aparato e instrumento deben están diseñados y contruidos para evitar la exposición de una persona a voltajes y/o corrientes peligrosas, sin embargo, estos elementos de seguridad se pierden completamente por no contar, entre otras cosas, con un adecuado sistema de tierra física.

Capítulo 2

RUIDO Y OTRAS SEÑALES DE INTERFERENCIA

El ruido puede tomar varias formas puede ser acústico, eléctrico e incluso óptico. La palabra ruido tiene una connotación que implica algo indeseable, sin embargo, cuando se puede obtener buena información de una señal ruidosa, el ruido no es un problema.

En equipo e instrumental electrónico hay fuentes específicas de interferencia que pueden ser eliminadas mediante un diseño apropiado. Estos ruidos pueden ser eléctricos de origen, tales como acoplamiento en fuentes de alimentación, ruido de transistores y de otros componentes. Otros ruidos son acoplados en el equipo mediante fuentes externas, tales como el arqueado ocasionado por interruptores, señales de radio, disturbios en la línea de alimentación, funcionamiento de transformadores de flyback(alto voltaje) presente en monitores de televisión y de computadoras.

El empleo de planos de tierra en los circuitos impresos, el cable coaxial, el par trenzado, cintillos metálicos alrededor de los transformadores, blindaje mediante jaulas de Faraday, blindaje con jaulas de material ferromagnético, etc., son algunas de las técnicas más empleadas para eliminar interferencia eléctrica con muy buenos resultados. Para llevar a cabo estos procedimientos se debe contar con un adecuado sistema de tierra física.

Atendiendo las necesidades planteadas en los párrafos previos, proponemos como objetivo general de la obra, mostrar de una manera concisa los conceptos y cálculos involucrados en un sistema de puesta a tierra, presentar de una manera práctica algunos procedimientos para la construcción de fosas de tierra física y concluimos enfatizando la importancia de una adecuada tierra física.

En este documento se trata exclusivamente lo concerniente a la puesta a tierra de los equipos a partir de sus partes metálicas que normalmente no conducen corrientes eléctricas.

Capítulo 3

PUESTA A TIERRA DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Es la conexión a tierra del neutro de un sistema eléctrico o de uno cualquiera de los conductores portadores de corriente eléctrica.

a.1) Uno de los objetivos de conectar los equipos eléctricos a tierra es limitar el potencial entre las partes conductoras de corriente del equipo eléctrico, y también entre estas partes y tierra (suelo) a un valor de seguridad (un valor muy bajo y de ser posible, cero) bajo todas las condiciones de operación, normal o anormal del sistema eléctrico.

a.2) Un segundo objetivo del aterrizaje del equipo eléctrico es obtener una trayectoria de baja impedancia para las corrientes de falla a tierra (corrientes por corto entre fases o de fase a neutro o de fase a tierra) de manera que entren en operación inmediata los interruptores termomagnéticos u otros elementos de seguridad. El riesgo para el usuario e instalaciones se manifiesta en el momento en que se presenta una falla a tierra. Si se forzara la corriente de falla a circular a través de una impedancia de tierra alta, esto origina una potencial que puede ser muy peligroso.

Asimismo, una gran impedancia en las uniones y conexiones o insuficiente sección transversal en los circuitos del sistema de tierra puede originar arcos o calentamientos de suficiente magnitud para iniciar un incendio de materiales combustibles o gases explosivos cerca de el punto de arco.

Capítulo 4

PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS NO ELÉCTRICOS

Algunos equipos que aparentemente no tienen que ver nada con la conducción de energía eléctrica o en general con el sistema eléctrico, requiere en algunos casos estar conectados a tierra. Estos equipos están en forma general relacionados con conceptos tales como generación de electricidad estática, descargas atmosféricas y voltajes inducidos.

Los objetivos que se persiguen al aterrizar equipos no eléctricos (en el sentido en que ellos no están alimentados directamente con energía eléctrica) son los siguientes:

b.1) Protección contra electricidad estática producida por fricción en algunos lugares en que existe la posibilidad de generación de electricidad estática por fricción, asociada con descargas, fuego y riesgos de explosión,

La generación electrostática se produce por objetos en movimiento que son dieléctricos, algún tipo de ropa, determinados materiales tales como papel, textiles, bandas transportadoras o de transmisión, etc., estos objetos pueden cargarse sorpresivamente a grandes voltajes a menos que estén apropiadamente conectados a tierra.

b.2) Protección contra descargas atmosféricas directas. En algunos lugares se presenta a menudo el problema de protegerse ellos mismos contra descargas atmosféricas, la exposición a esto es causada por las estructuras que se prolongan apreciablemente algunos metros sobre la superficie del suelo. En otras palabras puede ser necesario incluir en el problema general de sistema de tierra el uso de varillas (pararrayos) para conducir las descargas atmosféricas, uniones efectivas y conexiones a tierra para estas estructuras elevadas como chimeneas o tanques elevados.

b.3) Protección contra voltaje inducidos por descargas atmosféricas. La exposición a voltajes inducidos entra también en el problema de sistema de tierras, particularmente si existen sistemas de distribución aérea de potencia o circuitos de comunicación aéreos. Esto puede requerir de apartarrayos (comúnmente conocidos como pararrayos cuya función es liberar de carga eléctrica una área o construcción específicas, mediante el principio del efecto de puntas) localizados estratégicamente junto con buenas conexiones a tierra.

Capítulo 5

IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE TIERRA

Una gran parte de los accidentes personales, debidos a causas eléctricas, están relacionadas con el contacto directo con carcasas o partes metálicas no conductoras, se ha encontrado que de estos accidentes, la causa ha sido la falta de sistemas de tierra adecuados.

Un alto porcentaje de los fuegos originados en la industria y los hogares se debe a fallas en los sistemas de tierras.

Un aspecto relevante de un sistema de puesta a tierra tiene que ver con la eliminación de ruido electromagnético inducido en equipos de instrumentación y aparatos de medición en general, los cuales por requerimiento de las magnitudes y características de las señales que manejan, justifican el empleo de técnicas de blindajes como jaulas de Faraday o de pares de cables trenzados, los cuales resultarían imposibles de lograr de manera exitosa si no se cuenta con un buen sistema de tierra física.

Lo anterior puede dar una idea de la importancia y la atención que se debe dar a un sistema de puesta a tierra.

Capítulo 6

CARACTERÍSTICAS DE LAS TIERRAS

a) Naturaleza de un electrodo de tierra

La resistencia a la corriente a través de un electrodo de tierra tiene 3 componentes fundamentalmente [1]:

Resistencia del Electrodo. Las varillas metálicas, tubos masas metálicas, estructuras y otros dispositivos usados comúnmente para conexiones a tierra deben ser de suficiente tamaño o sección transversal de tal forma que su resistencia resulte prácticamente despreciable respecto de la resistencia total.

Resistencia de contacto electrodo-suelo. Esta debe ser muy pequeña si el electrodo está libre de pinturas o de grasa y si el suelo está bien apretado se ha demostrado a través de mediciones, que la resistencia de contacto puede ser despreciable. Conceptos tales como humedad, tipo de suelo, etc., por su importancia son tratados en un capítulo aparte.

Resistencia de la tierra alrededor del electrodo. Un electrodo enterrado en un suelo de resistividad uniforme radia corriente en todas direcciones [1]. Se puede suponer al electrodo como rodeado de varias capas de tierra (ver figura 1) todas de igual espesor.

- (1)- Resistencia del electrodo.
- (2)- Resistencia de contacto electrodo tierra.
- (3)- Resistencia del terreno.

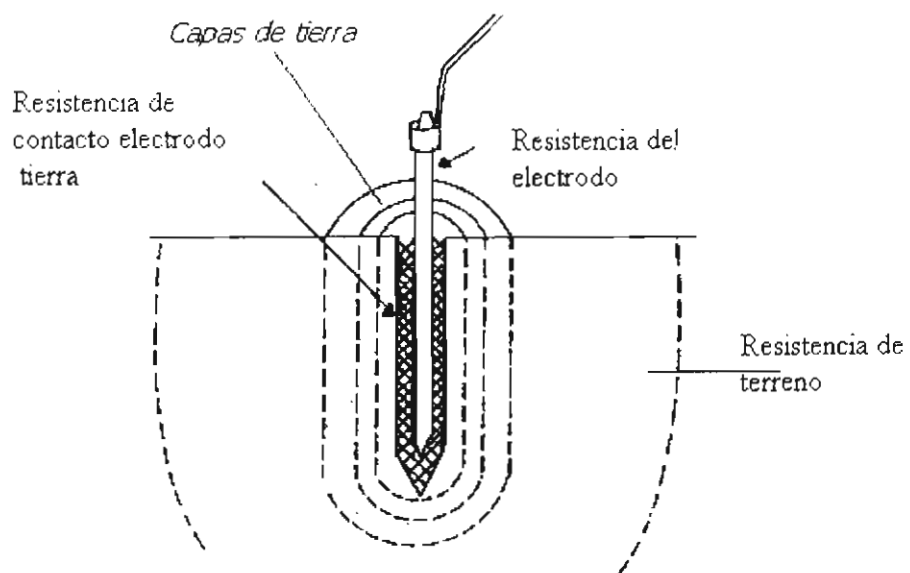


Figura 1. Componentes de resistencia de tierra en un sistema de tierra.

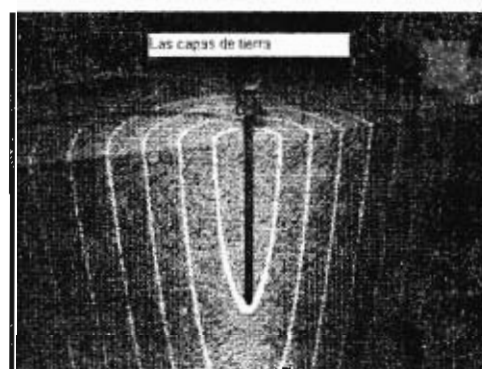


Figura 1bis. Otra perspectiva de las capas de tierra y sus efectos en el sistema de tierra.

El electrodo de tierra está rodeado de capas o pozos concéntricos, todos ellos del mismo grosor. Aquellos pozos más cercanos al electrodo de tierra tienen la menor cantidad de área resultando en un mayor grado de resistencia. Cada pozo subsecuente incorpora una mayor área resultando en una menor resistencia. Esto finalmente llega al punto donde pozos adicionales ofrecen una pequeña resistencia a la tierra que rodea al electrodo.

La capa más cercana al electrodo tiene naturalmente la menor superficie y por lo tanto ofrece una mayor resistencia, la siguiente capa es más grande en área y ofrece menos resistencia y así hasta llegar a una distancia tal en que una capa de tierra adicional no cambia significativamente la resistencia de la tierra que rodea al electrodo.

La resistencia de la capa de tierra que rodea al electrodo es la más grande de las tres componentes, por lo que se puede tomar como la resistencia de conexión a tierra. Más adelante se discutirán varios factores que afectan a este valor, entre otras cosas, se verá que la resistividad de la tierra depende del material que forma el suelo, del contenido de humedad y de la temperatura.

b) Principios involucrados en la determinación de la resistencia de tierra

La resistencia a tierra de cualquier sistema de electrodos puede calcularse teóricamente mediante fórmulas obtenidas a partir de la fórmula general de la resistencia [6]:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

, donde

ρ = resistividad de la tierra en ohm-cm.

L= longitud de la trayectoria de conducción cm

A= sección transversal de la trayectoria cm².

Se han desarrollado fórmulas más o menos complicadas para la obtención de la resistencia a tierra a cualquier distancia de varios sistemas de electrodos [6]. Todas esas fórmulas se pueden simplificar bajo la suposición de que la resistencia de la tierra es uniforme en un gran volumen de suelo considerado. Esto conduce por supuesto a errores ya que la resistividad de la tierra no es ni uniforme ni constante.

Para un electrodo de tierra de longitud L y radio a se tiene [1]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right)$$

Este hecho inclina a la medición directa de la resistencia de la tierra donde quiera que se necesite por métodos que, cómo se verá posteriormente, son muy simples.

c) Resistividad de la tierra

La resistividad de la tierra es una de las variables básicas que afectan la resistencia de una red de tierras, la cual varía notablemente con el tipo de suelo. Si es arcilloso o arenoso, su resistividad cambia drásticamente de un caso a otro, lo que es más, resulta difícil definir exactamente un suelo, por ejemplo, el término "arcilloso" encierra una gran variedad de suelos de distinta resistividad como se aprecia en las siguientes tablas[10],[12].

SUELO	RESISTIVIDAD Ohm-cm		
	Promedio	Mínimo	Máximo
Calcáreos	2370	590	7000
Arcillosos	4060	340	166300
Mismo, con proporciones variadas de arena y grava.	15800	1020	135000
Grava, arena, piedras y poco arcillosas	94000	59000	458000
Suelo superficial moldeable	100 - 500	100	500
Piedra caliza	500 - 400000	500	40000

TABLA 1. RESISTIVIDAD DE DIFERENTES SUELOS

La variación de la resistividad respecto del tipo de suelo también la podemos apreciar en la siguiente figura 2A.

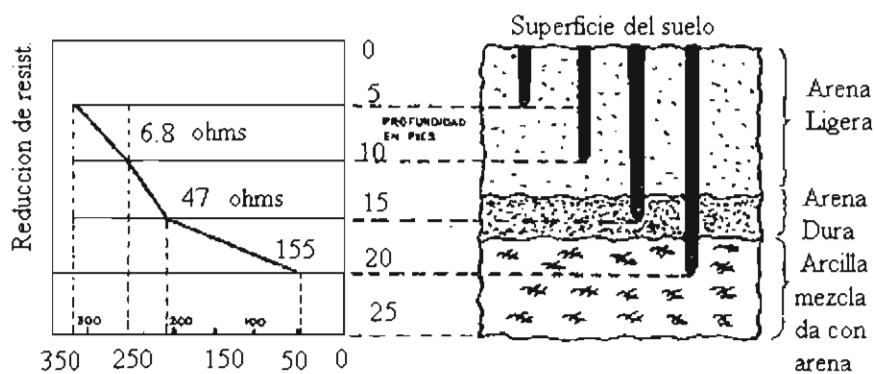


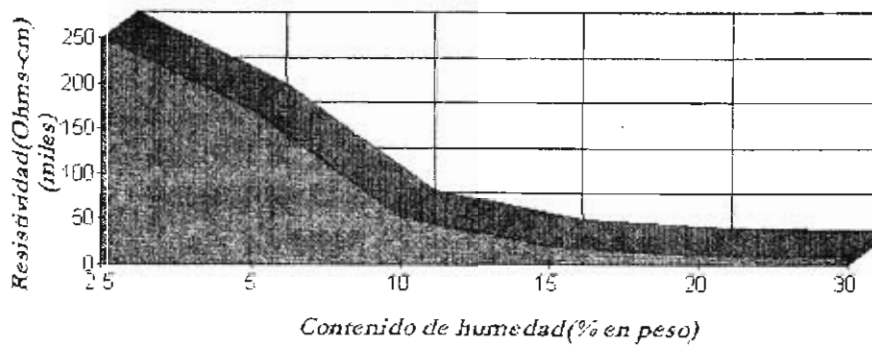
Figura 2A. mayor profundidad del electrodo menor resistencia. Estas gráficas también muestran la relación entre el carácter del suelo y la resistencia.

d) La resistividad decrece con la humedad y con las sales disueltas

En el suelo, la conducción de corriente es electrolítica. Por lo que la humedad y el contenido de sales afecta radicalmente su resistividad. La cantidad de agua en el suelo varía, por supuesto con el clima, época del año, naturaleza del subsuelo y nivel de la tabla de agua permanente. La tabla 2 muestra los efectos del agua en el suelo; note que cuando los 2 tipos de suelo están secos se comportan como buenos aisladores (resistividades mayores de 1000×10^6 ohms-cm). Sin embargo con un contenido de humedad de 15% ocurre un drástico descenso en la resistividad [6],[9]

Contenido de humedad, % del peso	Resistividad ohms-cm. Suelo superficial	Arena moldeable
0	100×10^6	1000×10^6
2.5	250,000	150,000
5	165,000	43,000
10	53,000	18,500
15	1,000	10,500
20	12,000	6,300
30	6,400	4,200

TABLA 2. EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

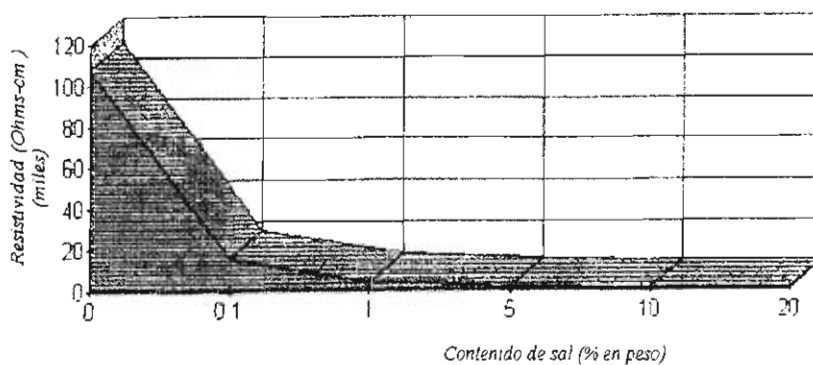


APRECIACIÓN GRÁFICA CORRESPONDIENTE A LA TABLA 2

Las sales naturales que se encuentran en la tierra, disueltas en agua bajan la resistividad tal como se aprecia en la tabla 3. Sólo una pequeña cantidad de sales reducen la resistividad del terreno significativamente(entre dichas sales tenemos sulfato de cobre y carbonato de sodio),este efecto puede resultar en una buena opción para proveer un electrodo de baja resistencia, en lugar de un sistema de electrodos caro y muy elaborado.

Sal agregada % del peso del material húmedo (Cloruro de sodio)	Resistividad ohm-cm
0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5	190
10	130
20	100

TABLA 3. EFECTO DEL CONTENIDO DE SAL EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA PARA SAL MOLDEABLE CON UN CONTENIDO DE HUMEDAD DE 15% RESPECTO DEL PESO TOTAL Y UNA TEMPERATURA DE 17°C



APRECIACIÓN GRÁFICA CORRESPONDIENTE A LA TABLA 3. [9]

e) Efecto de la temperatura en la resistividad de la tierra

La resistividad disminuye con el aumento de la temperatura como se ve en la siguiente tabla 4.

Temperatura °C	Resistividad Ohm-cm
20	7200
10	9900
0 (agua) Punto de cambio de fase	13800
0 (hielo)	30000
- 5	79000
- 15	330000

TABLA 5. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

f) Efecto de las diferentes estaciones en la resistividad de la tierra

Ya se ha visto que la resistividad de un terreno varía con la humedad, la temperatura y el contenido de sal por lo que es fácil comprender que aquella varía también con las diferentes estaciones del año, sobre todo en climas extremos donde hay época de lluvias, época de sequía y otras variaciones.

De acuerdo a lo expuesto y visto en tablas, se aprecia que la resistividad de la tierra es una cantidad variable, por lo que sí se desea conocer su valor, en un lugar dado y en una época específica, **la única forma segura de saberlo es midiéndola con los procedimientos que se describen posteriormente.**

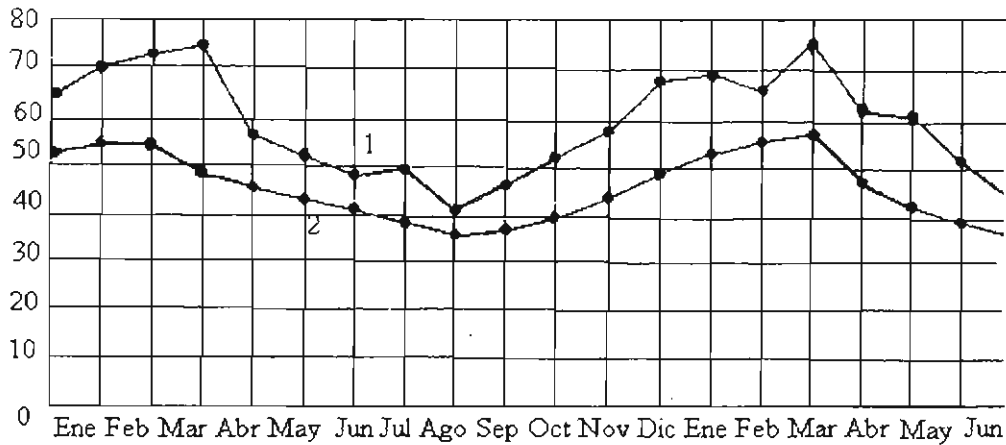


Figura 3. Resistividad del suelo, en general para todo tipo de suelo en mediciones de poca profundidad, atendiendo al patrón de precipitaciones pluviales que se presenta en el año.

Las curvas de la figura 3 muestran la variación de la resistividad en diferentes épocas (meses) del año [1] y [6]. Estas curvas muestran lo ya supuesto respecto a la variación de la resistividad en un periodo de $1 \frac{1}{2}$ cabe hacer el comentario que si el patrón de precipitaciones pluviales cambia drásticamente, no habrá mejor forma de conocer el parámetro mencionado sino por mediciones directas. Las curvas muestran también que a una mayor profundidad del electrodo se obtienen lógicamente valores más estables y más bajos por lo que se puede concluir que a distancias más profundas de la superficie de la tierra, la humedad y la temperatura de la misma son más estables. La figura 3 aplica para diferentes estaciones del año, con un electrodo de $\frac{3}{4}$ " de tubo en suelo arcilloso con grava y en un caso con una profundidad del electrodo de 3 pies(curva 1) y en otro con una profundidad de electrodo de 10 pies(curva 2),

Se recomienda que el electrodo de tierra deberá alcanzar una profundidad que tienda a lo siguiente:

- 1) Contenido de humedad constante
- 2) Temperatura constante.

Capítulo 7 CÁLCULO DE SISTEMAS DE TIERRA

El suelo es un medio de 3 dimensiones y la mayoría de las veces heterogéneo. Un cálculo preciso de la distribución de corrientes en el suelo durante una corriente de falla a tierra es muy difícil de alcanzar, debido al pobre conocimiento que se tiene de la resistividad del terreno y de sus variaciones en medio plano o superficial y a diferentes profundidades.

Debido a la gran resistividad eléctrica de la tierra, todas las corrientes que fluyen por ella producen una caída de tensión y por lo tanto se hace necesario romper el concepto popular que el potencial de la tierra es siempre cero. Por el contrario, pueden desarrollarse en su seno fuertes intensidades de campo eléctrico o gradientes de potencial que afectan a extensas regiones de la superficie terrestre.

La resistividad como ya se mencionó, es dependiente de varios parámetros, entre ellos están la clase de suelo, profundidad, humedad y temperatura. Para tener una idea del orden de magnitud de las cantidades que se deben manejar en estos sistemas, se desarrollará a continuación el caso más sencillo de un electrodo hemisférico en la superficie de una tierra homogénea (figura 4).

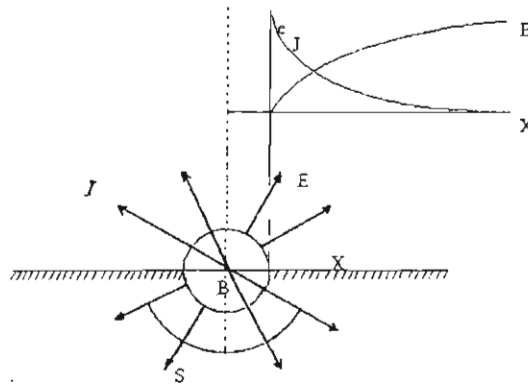


Figura 4. Flujo radial de corrientes de un electrodo hemisférico.

Si una corriente I pasa por este electrodo a tierra esparciéndose por esta en forma radial, la densidad de corriente a una distancia X es:

$$J = I / 2\pi X^2 \quad (\text{A/m}^2)$$

Y el gradiente de potencial, producido por esta densidad de corriente en la resistividad de la tierra es:

$$e = \rho J$$

$$e = \rho I / 2\pi x^2$$

La tensión o potencial de la integral lineal del campo desde la superficie de la esfera conductora de radio B hasta la distancia X .

$$V = -\int_B^x e dx = -\rho I / 2\pi \int_B^x dx / x^2 = -\rho I [1/x - 1/B] \div 2\pi = \rho I [1/B - 1/x] \div 2\pi$$

La densidad de corriente, la intensidad de campo e y la diferencia de potencial E se presentan gráficamente en la parte superior de la figura 4.

La tensión entre el electrodo hemisférico y un punto muy lejano con $X=\infty$ es de acuerdo con la ecuación última:

$$E = \rho I / 2\pi B$$

Y por lo tanto la resistencia que encuentran las líneas de corriente que divergen del hemisferio es:

$$R = E/I = \rho / 2\pi B = 0.16 \rho / B$$

Como ejemplo, si el radio del hemisferio es 1 m y el electrodo está enterrado en un terreno con resistividad 10^2 ohm-m

La resistencia a tierra del electrodo es:

$$R = 0.16 \rho / B = 0.16 \cdot 100 \text{ ohm-m} / 1 \text{ m} = 16 \Omega$$

En forma análoga se pueden calcular las características para otras configuraciones de electrodos como conductores lineales en forma de anillo, de mallas, de placas, de varillas verticales enterradas, etc. Como ilustración, la resistencia de una varilla vertical enterrada desde la superficie con una longitud L y radio a es:

$$R = (\rho / 2\pi L) (\ln(4(L/a) - 1))$$

Así para una varilla de $L = 3\text{m}$ y diámetro de 0.05m enterrada en un suelo de resistividad $100\Omega\text{-m}$ resulta:

$$R = 100 / 2\pi \cdot 3 (\ln(4(3) / 0.025 - 1))$$

$$R = 27.46\Omega$$

Como último, hay que considerar que varias varillas enterradas, espaciadas uniformemente no bajan la resistencia como si se consideraran en paralelo pues la distribución de corriente no resulta uniforme.

Capítulo 8

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE TIERRA Y DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Debido a lo complicado de las fórmulas para el cálculo, es necesario realizar mediciones tanto de la resistencia de los electrodos como de la resistividad el terreno.

1) Medición de la resistencia de tierra

El principio que sirve de base a la medición de la resistencia de electrodos es el siguiente:

Suponga que se tienen 3 varillas enterradas, apartadas cierta distancia entre sí como se muestra en la fig. 5, la corriente entre las varillas 1 y 2 se mide con un amperímetro; el voltaje entre las varillas 1 y 3 se mide con un voltímetro.

Si la varilla 3 se localiza en varios puntos entre las varillas 1 y 2, preferentemente en línea recta, se pueden obtener una serie de lecturas de voltaje y corriente, con lo que puede determinar la resistencia de la tierra en cualquier punto medio. Por ejemplo si el voltaje medido entre las varillas 1 y 3 es de 30 volts y la corriente I es de 2 amperes la resistencia en ese punto será:

$$\begin{aligned} R &= V/I \\ &= 30/2 \\ &= 15\Omega \end{aligned}$$

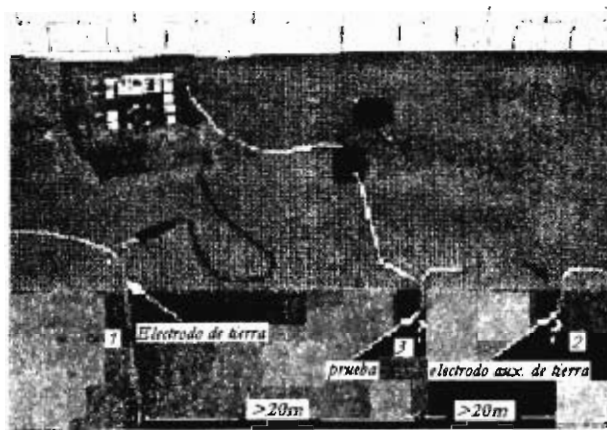


Figura 5. Principio de la medición de la resistencia a tierra.

La serie de valores obtenidos de resistencia se puede graficar contra la distancia entre la varilla 1 y 3. Note que cuando la varilla 3 se aleja de la varilla 1, los valores de resistencia se incrementan pero el grado de aumento va disminuyendo con la distancia hasta un punto en que es tan pequeño que puede ser considerado como constante (20 ohms en la figura 5). Las capas del terreno entre las varillas 1 y 3 tienen un área tan grande que agregan muy poca resistencia a la resistencia total. Después de ese punto, conforme la varilla 3 se aproxima a las capas de suelo de la varilla 2, la resistencia sube gradualmente y cerca de la varilla 2, los valores suben rápidamente.

Ahora digamos que la varilla 1 es el electrodo de tierra bajo prueba. De una curva típica de resistencia de tierra como la de la fig. 5A. ¿Cuál es la resistencia de tierra de este electrodo? Llamemos a la varilla 2, varilla de referencia de corriente C_2 y la varilla 3 electrodo auxiliar P_2 . La resistencia correcta se obtiene usualmente si la varilla 3 (P_2) se coloca a una distancia del centro del electrodo de tierra (varilla 1) aproximadamente a 62% de la distancia entre el electrodo de tierra y C_2 (varilla 2).

Por ejemplo en la fig. 5A la distancia entre los electrodos P_1 , C_1 y C_2 es de 100 pies, tomando 62% de 100 da 62 pies; a esta distancia la resistencia es de 20 ohms.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se puede uno preguntar, si la localización correcta de la varilla P_2 es siempre 62% de la distancia entre el electrodo de tierra y C_2 ¿Para qué molestarse haciendo mediciones en otros puntos distintos al de 62%? ¿Porqué no medir directamente a 62% y suponer que el valor obtenido es el correcto?

Los niveles de resistencia medida están suficientemente separados y a 62% de la distancia éste es muy cercano al valor real de la resistencia. La razón de colocar a C_2 suficientemente alejado es tener la certeza de que no habrá traslapes con la zona de influencia de los otros electrodos y por tanto, seguridad con los otros valores de la curva.

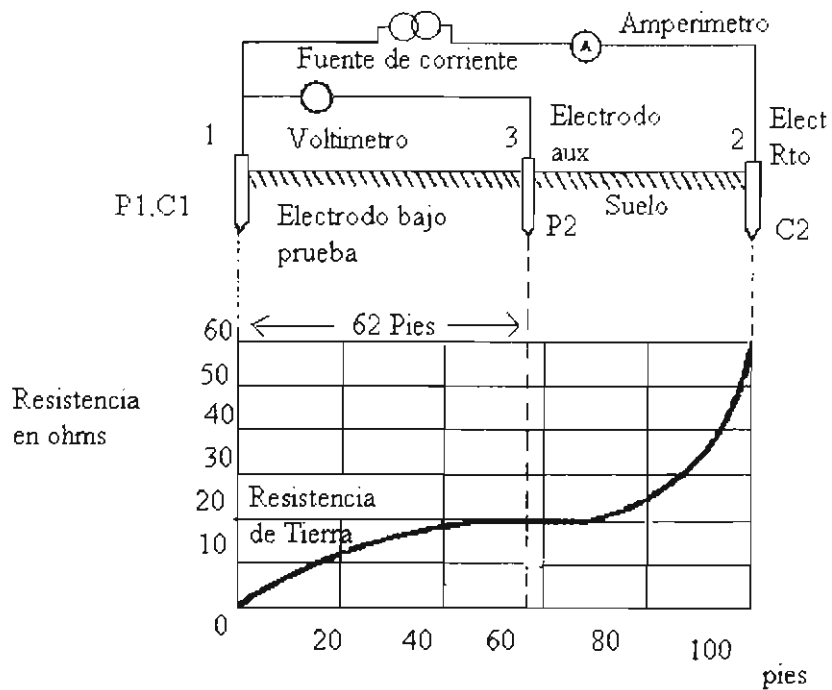


Figura 5A. Metodo del 62 % para la obtención rápida de la resistencia de tierra

2) Medición de la resistividad del suelo

El mismo instrumento utilizado para medir la resistencia de la tierra, (Megger) se usa para medir la resistividad del suelo. Sólo que ahora se utilizan 4 electrodos pequeños enterrados a la misma profundidad y separados la misma distancia entre sí en línea recta. (figura 6). Los electrodos se conectan al instrumento mediante 4 cables independientes. De aquí que el nombre de esta prueba es método de las 4 terminales. La teoría para desarrollar este método se realizó desde 1915 y se demostró que si la profundidad (B) de electrodo es pequeña comparada con la distancia entre electrodos (A), [2], se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \pi A R \text{ donde:}$$

ρ = es la resistividad promedio a una profundidad A en ohm-cm

A = distancia entre electrodos en cm

R = lectura del Megger

En otras palabras, si la distancia A entre electrodos es de 4 pies, se obtiene la resistividad promedio del suelo a una profundidad de 4 pies como sigue [6]:

Se recomienda generalmente que $B = (1/20) A$

a) Convierta los 4 pies a centímetros para obtener A en la fórmula:

$$4 \times 12 \times 2.54 \text{ cm.} = 122 \text{ cm.}$$

b) Multiplique $2 \times A$ para obtener una constante para una prueba dada:

$$2 \times 3.1416 \times 122 = 766$$

Ahora por ejemplo si en su instrumento se lee 60 ohms, la resistividad del terreno será:

$$60 \times 766 = 45960 \text{ ohms-cm}$$

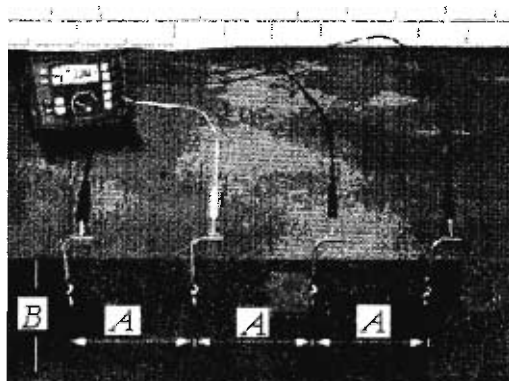


Figura 6. Método de cuatro terminales para medir la resistividad del suelo

Capítulo 9 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE TIERRA

Cuando se encuentra que una resistencia de electrodo de tierra no es suficientemente baja, hay varias maneras para mejorarla.

- a) Longitud del electrodo de tierra
- b) Uso de varios electrodos
- c) Tratamiento del suelo

a) Efecto de la longitud del electrodo. Como se puede suponer, enterrando un electrodo de mayor longitud, materialmente se disminuye su resistencia. En general, "si se duplica la longitud del electrodo se reduce la resistencia aproximadamente 40%"; la curva de la figura 7 muestra este efecto. Por ejemplo, una varilla enterrada 2 pies tiene una resistencia de aproximadamente 88 ohms. La misma varilla enterrada 4 pies tiene una resistencia de aproximadamente 50 ohms. Usando la regla de reducción de 40% mencionada arriba se tiene que $88 \times 0.4 = 35$ ohms de reducción. Esto es, siguiendo este procedimiento se puede decir que una varilla de 4 pies tiene una resistencia de $88 - 35 = 53$ ohms. [4]

Se puede pensar también que aumentando el diámetro del electrodo se baje la resistencia, en efecto esto ocurre pero ligeramente. Para la misma profundidad, si se dobla el diámetro del electrodo este reduce su resistencia pero sólo en un 10% (figura. 7). Por ejemplo, un electrodo de 10 pies de profundidad, $5/8$ diámetro tiene una resistencia de 6.33 ohms; aumentando su diámetro a $1\frac{1}{4}$ la resistencia baja a sólo 5.6 ohms. Por esta razón, el aumento de diámetro sólo se recomienda en lugares cuyo suelo es muy duro.

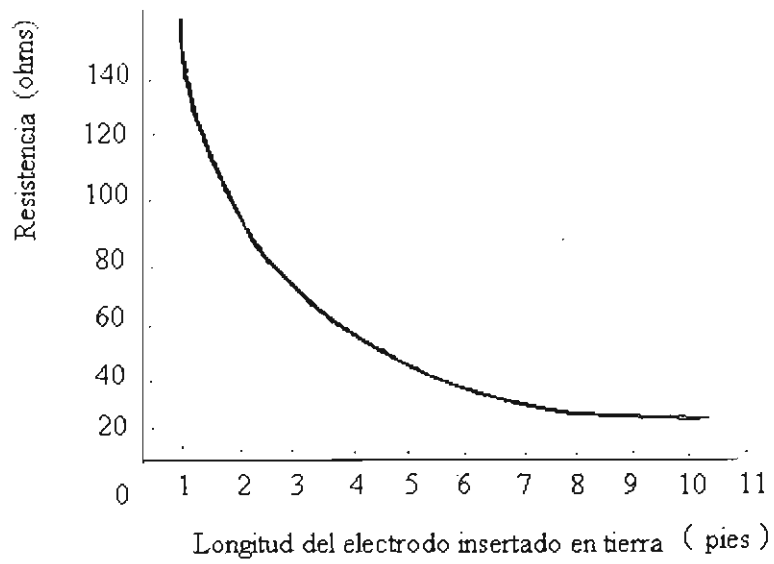


Figura 7. La resistencia del sistema de tierra decrece con la profundidad del electrodo.

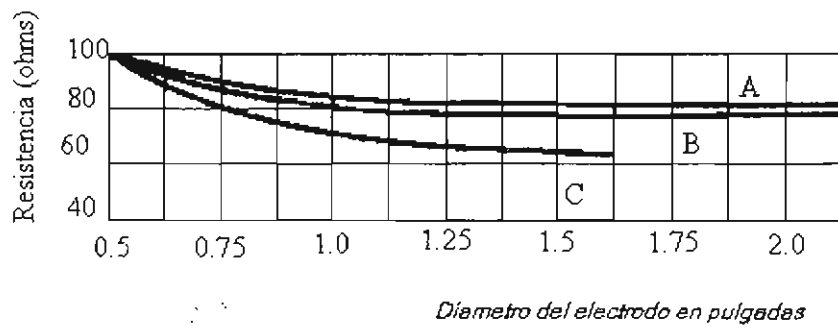


Figura 8. El diámetro del electrodo tiene poca influencia en la resistencia de tierra.

- b) Uso de varios electrodos. Dos electrodos bien espaciados enterrados en el suelo proporcionan 2 trayectorias en paralelo. Ellas son en efecto 2 resistencias en paralelo. La regla de 2 resistencias en paralelo no aplica exactamente; esto es, la resistencia resultante no es de la mitad de una de ellas, si estas son iguales. Realmente, la reducción lograda si se tienen 2 electrodos de la misma resistencia es de 60%, si se tienen 3 es de 40% y si se tienen 4 es de 33% (fig. 9) [5].

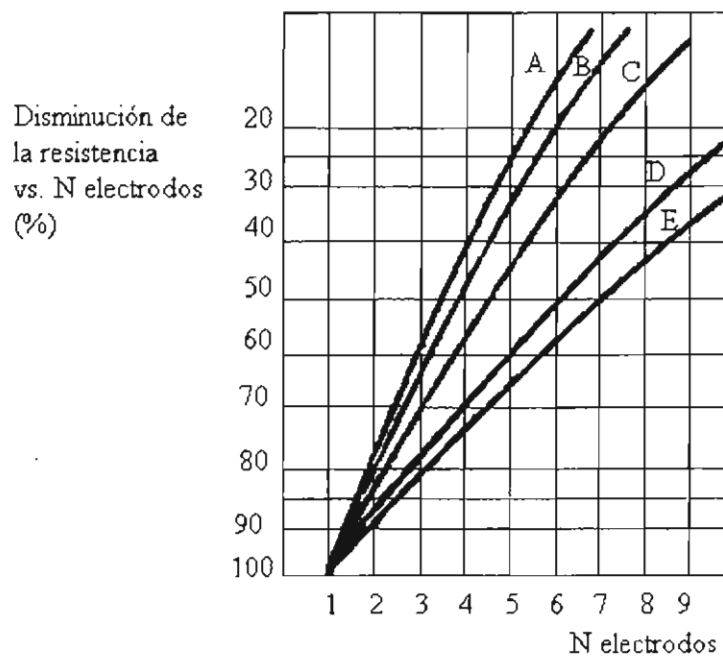


Figura 9. Resultado promedio obtenido para varios electrodos de tierra.

Electrodo sencillo = 100%

2893105

A= Separación de 100 pies

B= Separación de 40 pies

C= Separación de 20 pies

D= Separación de 10 pies

E= Separación de 5 pies

Cuando se usan varios electrodos, estos deben estar separados entre sí una distancia mayor que su longitud sumergida. Hay razones teóricas para esto, pero basta sólo referirse a las curvas de la figura 9 para comprobarlo. Por ejemplo, si se tienen 2 electrodos en paralelo y 10 pies de separación, la resistencia baja a más o menos 60%, si la separación aumenta a 20 pies, la reducción disminuye hasta el 50%.

c) Tratamiento químico del suelo. El tratamiento químico del terreno es un buen medio para bajar la resistividad del mismo cuando los electrodos de tierra ya no se pueden enterrar más debido a la dureza del suelo. Los químicos permiten reducir la resistividad de cualquier tipo de suelo desde un 15 hasta un 90%, dependiendo del tipo y textura del terreno. Existe un importante número de químicos para este propósito. Incluyendo cloruro de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre y cloruro de calcio. La sal común (cloruro de sodio) y el sulfato de magnesio son los más comúnmente empleados. Estos químicos son generalmente aplicados de tal manera que no queden en contacto directo con el electrodo, sino en fosas circulares concéntricas a éste; el efecto de estos químicos puede ser acelerado saturando el área con agua. Cabe hacer el comentario que este tipo de tratamiento no es permanente debido a que por efecto de las lluvias, el terreno sufre de lavados, por tal motivo este tratamiento debe ser renovado periódicamente dependiendo de la naturaleza y característica del suelo.

Capítulo 10

TIPOS Y SISTEMA DE ELECTRODOS

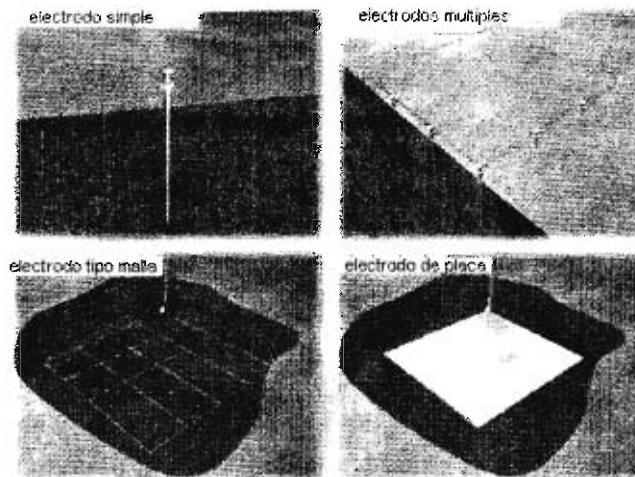


Figura 10. Vista general de diversos tipos de electrodos.

a) Electrodo tipo placa

La práctica preferida con estos consiste en enterrarlos con una mínima excavación, no existe una diferencia importante entre la resistencia efectiva de una placa horizontal y una vertical, razón por la cual los hace aún más prácticos. Para placas comúnmente usadas de 0.9 a 1.9 m^2 , la profundidad óptima de la fosa está entre 1.52 y 2.4 m . [9]

b) Sistema de rejilla

Este sistema usualmente se extiende en toda el área de la construcción y aun más allá. Consiste de conductores enterrados a un mínimo de 0.15 m en el suelo, formando una red de cuadrados o rectángulos el espaciamiento de los conductores de la red comúnmente empleado es de 3.0 a 3.7 m . Todos los cruces de los cables deben ser perfectamente firmes, y el sistema deberá conectarse a todos los equipos y estructuras de acero. En tierras rocosas en donde las barras de tierra no son prácticas, es deseable usar un sistema de rejilla. [9]

Capítulo 11

CONEXIÓN DE LOS ELECTRODOS AL SISTEMA DE TIERRA

Básicamente son dos las técnicas empleadas para llevar a cabo la conexión:

La primera requiere el uso de sujeción mecánica, ésta es fácilmente disponible y de fácil instalación, desconectable para fines de hacer mediciones de la resistencia de la tierra, sin embargo, la corrosión en las uniones suele representar problemas cuando el ambiente y el medio es desfavorable.

La segunda técnica involucra un proceso térmico, que consiste en formar pequeñas cápsulas en torno a la unión, en éstas se agrega pólvora de manera que se genere una pequeña explosión para que con ese calor sea fundida la unión como si se tratara de una sola pieza. Este método provee una conexión permanente, elimina la resistencia del contacto, es relativamente libre de corrosión, su empleo cada vez se incrementa, sobre todo cuando se requiere hacer muchas conexiones. Este método tiene limitaciones inherentes, se requiere de algún medio para realizar separaciones con la finalidad de efectuar mediciones de resistencia, no se recomienda esto en presencia de mezclas volátiles o explosivas.

Es importante que toda superficie de los materiales que se van a conectar, este libre de cualquier medio aislante tal como grasa, pintura o polvo antes de efectuar la conexión.

Capítulo 12 TIPOS DE BARRAS COMERCIALES

Las barras de tierra son manufacturadas en copperweld (cobre tratado para evitar corrosión) en diámetros de 3/8, 1/2, 5/8, 3/8 y 1 pulgada (9.53, 12.7, 15.88, 19.05 y 25.4) en longitudes de 5 a 40 pies (1.5 a 12.2m) para la mayoría de las aplicaciones. Los diámetros de 1/2, 5/8 y 3/4 de pulgada (12.7, 15.88 y 19.05 mm) en longitudes de 8, 10, 12 y 16 pies (2.44, 3.05, 3.66 y 4.88m) son satisfactorias de acuerdo a la norma NEC.[1]

Esta misma norma, especifica que las barras de acero o hierro deberán ser de al menos 5/8 de pulgada (15.88mm) de diámetro y que las barras de materiales no ferrosos deberán ser no menores a 1/2 pulgada (12.7mm) de diámetro.

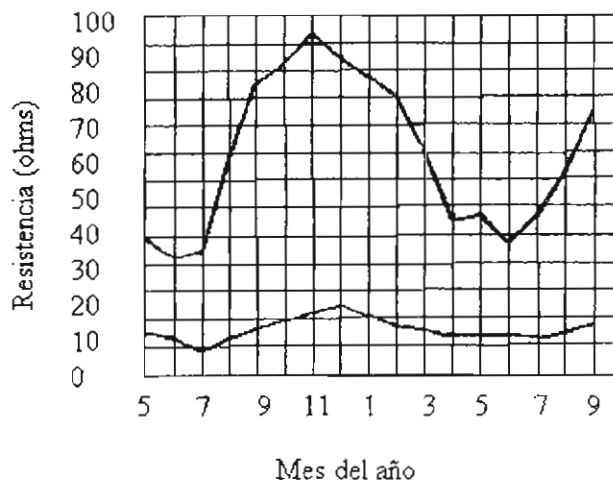


Figura 11. El tratamiento químico baja la resistencia de la tierra y disminuye las variaciones de ésta en las diferentes épocas del año.

- A) Suelo no tratado. Electrodo de 5/8 de pulgada x 8 pies
- B) Suelo tratado químicamente, electrodo de 5/8 de pulgada x 8 pies

Obsérvese el cambio impresionante en la resistencia del sistema, sin embargo hay que tener presente la poca permanencia del tratamiento por si solo

Capítulo 13

PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

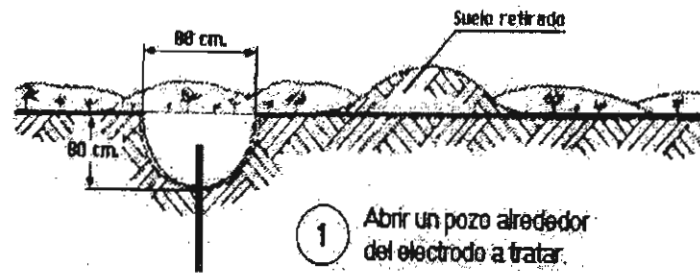
Las distintas formas de ampliar el diámetro teórico y la longitud de los electrodos de puesta a tierra, conlleva fundamentalmente aumentar la conductividad de éstos al medio físico (terreno) que los rodea, y por consecuencia aumenta el nivel de seguridad de las instalaciones eléctricas.

Básicamente se utilizan dos elementos distintos, bentonita (es una arcilla cuyo mineral constitutivo es la montmorillonita, conductiva e impermeable a la migración de sales corrosivas, comercialmente se consigue en ciertas droguerías como la farmacia París de la ciudad de México) y un gel cuya fórmula se fundamenta en las propiedades de ésta, pero con aditivos (como los mencionados: sal común y sulfato de magnesio) que mejoran sus propiedades.

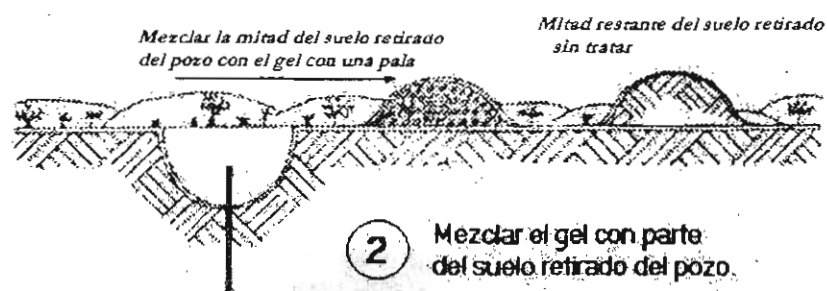
Electrodos de hasta 3m.

El método que se comenta a continuación tiene como ventajas su bajo costo facilidad y su rapidez de instalación. Puede ser aplicado en cualquier tipo de instalación eléctrica, principalmente donde se dispone de espacio físico reducido y valores elevados de resistividad del terreno.[11]:

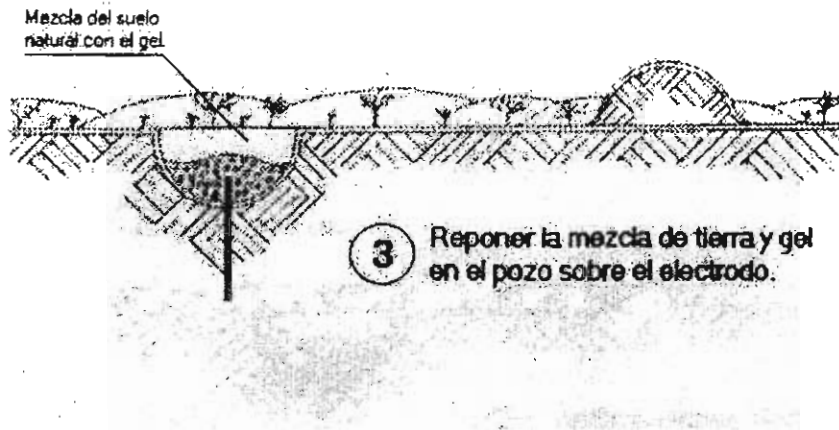
Abrir un pozo alrededor del electrodo de aproximadamente 80cm de diámetro, y como mínimo de 80 cm de profundidad; aunque conviene que sea lo más profundo posible. Quitando, de la tierra retirada del pozo, toda piedra que pudiera existir y tratar de desmenuzar cualquier terrón grande.



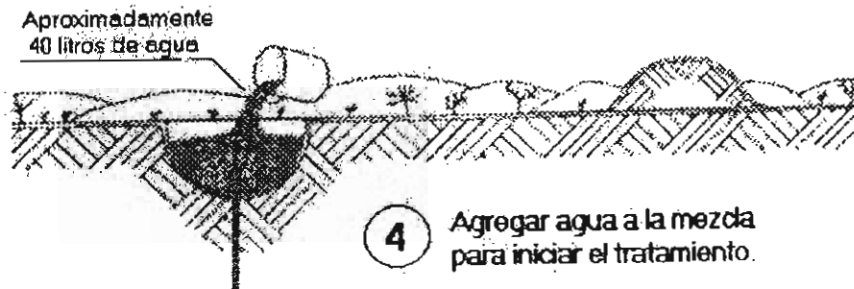
Mezclar en partes iguales el gel o la bentonita con la tierra recién tratada, procurando formar una mezcla uniforme.



Colocar en el pozo la mezcla anteriormente descrita, hasta rellenar tres cuartas partes de éste.

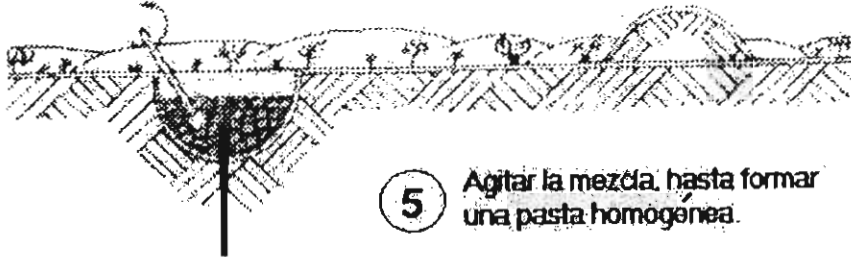


A continuación agregar agua; aproximadamente unos 40 litros; aunque esta cantidad puede variar de acuerdo al tipo de terreno y profundidad del pozo realizado.



Agitar la mezcla del pozo por medio de un elemento adecuado, teniendo la precaución de no golpear al electrodo.

Agitar la mezcla hasta formar una pasta.



5 Agitar la mezcla hasta formar una pasta homogénea.

Finalmente, reponer el resto del suelo inicialmente retirado y compactar ligeramente. Se recomienda que, dependiendo de la zona o la temporada de sequía se este vertiendo agua de manera regular sobre la ubicación de la fosa.

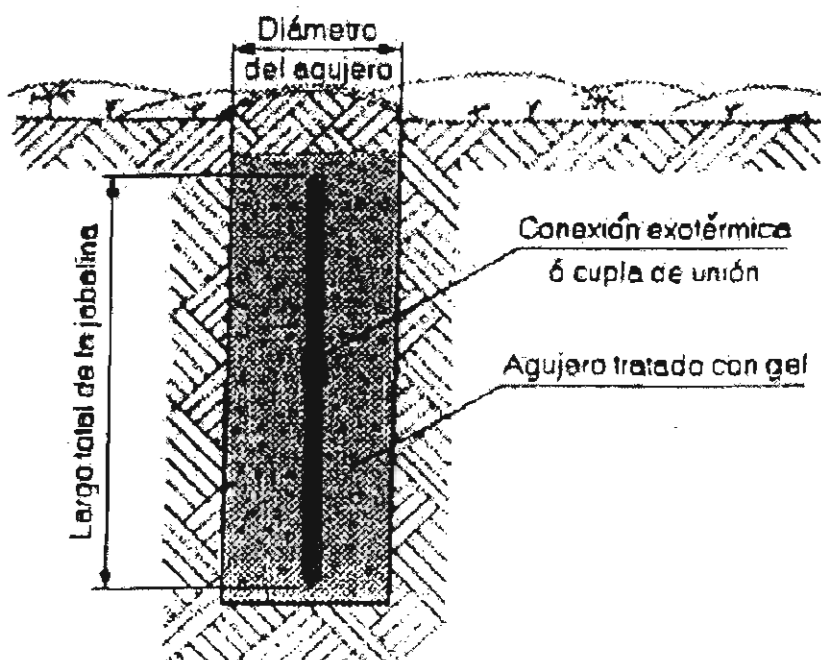
Reponer el resto del suelo (sin tratar) sobre la mezcla preparada y compactar



6 Reponer el resto de suelo; el tratamiento esta terminado.

Electrodos de más de 3m

Cuando se emplean en una puesta a tierra, electrodos de más de 3m, conviene utilizar el siguiente método: [11]



1) Realizar una perforación de una profundidad 0.50m mayor que el largo total de los electrodos a instalar y un diámetro de 0.20m

1 a) Si se emplea GEL, mezclar éste con la mitad del terreno retirado de la perforación, agregar 20 litros de agua por cada dosis de gel utilizada. Luego de

formar una mezcla homogénea, rellenar la perforación y proceder a enterrar las barras.

1 b) Si se emplea BENTONITA, mezclarla en partes iguales con yeso y rellenar la perforación. Enterrar las barras y a continuación humedecer la mezcla vertiendo agua en forma lenta, preferentemente sobre la jabalina.

2) La instalación ha finalizado.

A continuación proceder a realizar la conexión del conductor con la barra. Es recomendable que para unir las barras entre sí y ésta con el conductor; emplear soldaduras cuproaluminotérmicas.

Capítulo 14

OTRA RECOMENDACIÓN PARA LA PUESTA A TIERRA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO [4]

- A) Disposición física. Se recomienda que un cable continuo forme el perímetro exterior de una malla de conductores enterrados, a una profundidad que usualmente varía entre 0.5 metros y 1.0 metros de manera que encierre toda el área en el que se encuentra el equipo o subestación que se desea aterrizar.

La malla puede estar constituida por cables colocados paralela y perpendicularmente, con un espaciamiento razonable (por ejemplo formando rectángulos de 3x6 metros). En lo que sea posible, los cables que forman la malla deben colocarse a lo largo de las hileras de estructuras o equipo, para facilitar la conexión de los mismos.

Se recomienda que los conductores de la malla sean de cobre, con calibre mínimo de 4/0 AWG (107.2 mm²) y que los conductores de puesta a tierra del equipo no sean de un calibre inferior a 2 AWG (33.6 mm²).

En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente entre sí y en los puntos adecuados, conectarse a electrodos de tierra de 2.5 metros de longitud o más, clavados de manera vertical (preferentemente bajo los criterios expuestos en párrafos anteriores).

- B) Materiales. Cada elemento del sistema de tierra (malla, conectores y electrodos) debe ser elegido de manera que cumpla con lo siguiente:

b.1) Tener un punto de fusión suficientemente alto para no sufrir deterioro bajo las más severas condiciones de las magnitudes de corriente de falla y duración de las mismas.

b.2) Tener resistencia mecánica suficiente y ser resistente a la corrosión.

b.3) Tener suficiente conductividad, de manera que dichos elementos no contribuyan substancialmente a originar diferencias de potencial peligrosas.

- C) Resistencia a tierra de la malla. La resistencia total de la malla con respecto a tierra se puede determinar, en forma simplificada [1] por la expresión:

$$R=(\rho/4r) + (\rho/L), \text{ ohms}$$

Donde:

r , es el radio de metros de una placa circular equivalente, cuya área es la misma que la ocupada por la malla real de tierra.

L , es la longitud total de conductores enterrados, en metros

ρ , es la resistividad eléctrica del terreno en ohm-metro

La resistencia eléctrica total del sistema de tierra debe conservarse en el valor más bajo posible (los valores aceptables van desde 10Ω hasta menos de 1Ω , incluyendo todos los elementos que forman el sistema de tierra.

CONCLUSIONES

El **sistema** de tierra física le proporciona cuatro ventajas:

- (1) **disipa las corrientes acumuladas de forma que un rayo NO SEA ATRAIDO a sus instalaciones.**
- (2) **Si el rayo cae, o si se acumula una alta carga, su conexión a tierra suministra un sendero seguro para la descarga directa a tierra más que a través del cableado.**
- (3) **reduce el peligro de choque eléctrico de los equipos y plantas con mayor voltaje alterno en sus instalaciones, y**
- (4) **reduce los ruidos eléctricos y de radio causados por los inversores, motores, luces fluorescentes y otros dispositivos.**

Con relación a la calidad de la puesta a tierra téngase en mente que tratándose de un solo electrodo ya sea una barra, una placa o tubería, si no tiene una resistencia a tierra de 25 ohms o menos, inevitablemente deben agregarse al sistema electrodos adicionales considerando que la longitud del electrodo en contacto con el suelo debe ser al menos de 8 pies y en la forma descrita a lo largo del presente trabajo, no resulta conveniente especificar un valor máximo para la resistencia de tierra, pero para algunos sistemas específicos en localidades definidas son requeridos valores de resistencia tan bajos como fracciones de ohms. La resistencia a tierra cambia en función del clima y temperatura por lo que sugerimos el tratamiento químico del suelo en las circunstancias ya descritas teniendo siempre presente que todo cuanto hagamos para mejorar nuestro sistema de tierra física va a redundar en una operación exitosa de sistemas industriales, de instrumentos y sistemas electrónicos y por supuesto en la seguridad de toda persona involucrada en el uso y manejo de éstos.

La agresividad del *suelo en los electrodos de puesta a tierra* se manifiesta a través de la inevitable corrosión que propicia el lento incremento de su *resistencia de dispersión* y su destrucción.

Toda instalación de *puesta a tierra*, debe compatibilizar exigencias que por naturaleza son favorables al fenómeno de corrosión, con otras que son contrarias y que están orientadas a la preservación de los electrodos y su correcto funcionamiento.

Para obtener una instalación de *puesta a tierra* estable, de gran capacidad dispersora y larga duración, se podrá utilizar un electrodo resistente a la corrosión (Cobre) aislado de las sales con un relleno neutro y conductivo (Bentonita).

¡¡¡LA SEGURIDAD ES PRIMERO!!! Si no está seguro de saber cablear su sistema adecuadamente, busque asesoría profesional.



2893105

APÉNDICE

La corrosión en un sistema de tierra

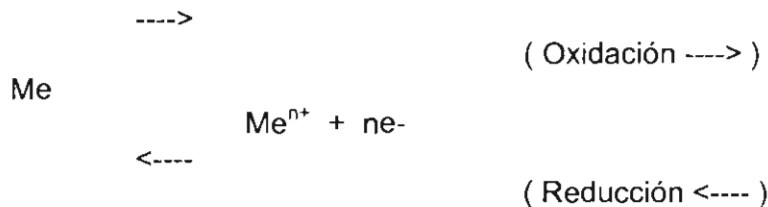
La puesta a tierra conformada por electrodos enterrados en contacto directo con el suelo natural o mayormente a través de un relleno constituido por tierra, mezclada con sales conductoras disueltas en agua, para de ese modo poder dispersar con la mínima resistencia eléctrica, corrientes menores de carga estática, fuga, desbalance, erráticas, etc. y también ocasionalmente otras de mayor magnitud como son las corrientes inducidas, de corto circuito o de rayo; su funcionamiento conductor y dispersor es entonces ininterrumpido, asegurando la protección de las personas principalmente contra toques eléctricos y facilitando la referencia del potencial cero para el correcto funcionamiento de los aparatos eléctricos y electrónicos.

El modo de instalación descrito, constituye visto de otro modo la inmersión de un objeto metálico en una masa electrolítica no homogénea y con diferentes concentraciones salinas y de oxígeno lo cual es susceptible de configurar un esquema disperso de Celdas Básicas de Corrosión micro y macro en toda la superficie de contacto del electrodo con el relleno.

¿CÓMO OCURRE LA CORROSIÓN EN EL SUELO?

Los armados metálicos subterráneos como es el caso de los electrodos de puesta a tierra, se corroen por electrólisis; se trata de fenómenos de naturaleza electroquímica los cuales implican movimientos de electrones desde las zonas anódicas, (donde tiene lugar la oxidación), a las zonas catódicas (donde ocurre la reducción)

a través de las partes del metal no involucradas en la reacción, cerrándose el circuito por el electrolito, (suelo húmedo) que es una solución caracterizada por su conductividad iónica: la ecuación electroquímica básica es entonces:



De ese modo la corrosión denominada electrogenética galvánica puede ocurrir conformando celdas de corrosión:

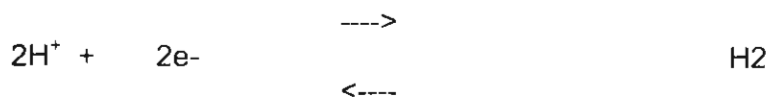
- Galvánicas: En presencia de metales no similares en un mismo electrólito, o bien;
- Electrolíticas: En presencia de un mismo metal inmerso en diferentes electrólitos, o
- De concentración: En un mismo metal inmerso en diferentes concentraciones de un mismo electrólito.

En los casos en los que los metales son diferentes, el más catódico pasivo o (noble) prevalece a costa del deterioro permanente hasta su desaparición, del metal anódico (activo); y cuando se trata de un mismo metal y diferentes concentraciones de un mismo electrólito, las partes en deterioro son aquellas que sufren el mayor flujo de corriente continua saliendo hacia el electrólito (suelo húmedo). Dichos procesos espontáneos y permanentes, obedecen a la existencia de diferencias de potencial de hasta cientos de milivoltios, asociados a la presencia de los metales.

Los potenciales propios de los metales

El refinamiento de los minerales metálicos para la obtención de los metales puros involucra el uso de ingente energía térmica que según la estructura molecular del metal, prevalece en forma de un potencial eléctrico propio, como una cualidad que le permite a largo plazo el retorno a su estado natural (óxido metálico); dicho parámetro se mide en cada caso, exponiendo al metal puro a una solución que contiene un átomo gramo en peso de sus respectivos iones, y está relacionado con la propia energía de remoción de electrones para alcanzar el equilibrio según la ecuación electroquímica básica arriba mencionada.

Al comparar dichos potenciales propios con un patrón de reducción o de oxidación, se puede establecer una clasificación jerárquica; tal es el caso, de la serie electroquímica obtenida al escoger la reducción del hidrógeno (H₂/H⁺) a la que arbitrariamente se le asigna el potencial cero.



De ese modo el lugar que ocupa cada metal en la clasificación de potenciales electroquímicos o potenciales de electrodo, estará dado por la expresión.

$$\Delta E = E_{\text{M}(\text{Mn}^+)} - E_{\text{H}_2(\text{H}^+)}$$

Según lo cual, los metales más resistentes a la corrosión (más catódicos o nobles), son aquellos que producen menos electrones que el hidrógeno y por lo tanto presentan un potencial de electrodo más positivo; en el cuadro N° 1 el oro encabeza la serie con $V = + 1.5$ voltios, mientras que los metales alcalino terrosos presentan potenciales negativos mayores, el Litio cierra la lista con $V = - 3.0$ voltios.

Electrodo			Potencial (V)		
Au ⁺⁺⁺	+ 3e ⁻	=	Au	Metales	+ 1.42
Ag	+ 1e ⁻	=	Ag	Catódicos	+ 0.7996
Fe ⁺⁺⁺	+ 1e ⁻	=	Fe ⁺⁺	(Nobles)	+ 0.770
Cu ⁺⁺	+ 2e ⁻	=	Cu		+ 0.3402
2H ⁺	+ 2e ⁻	=	H ₂		0.000
Pb ⁺⁺	+ 2e ⁻	=	Pb		- 0.1263
Sn ⁺⁺	+ 2e ⁻	=	Sn		- 0.1364
Ni ⁺	+ 2e ⁻	=	Ni		- 0.230
Fe ⁺⁺	+ 2e ⁻	=	Fe		- 0.409
Cr ⁺⁺⁺	+ 3e ⁻	=	Cr		- 0.74
Zn ⁺⁺	+ 2e ⁻	=	Zn		- 0.7628
Al ⁺⁺⁺	+ 3e ⁻	=	Al	Metales	- 1.706
Mg ⁺⁺	+ 2e ⁻	=	Mg	Anódicos	- 2.375
Li ⁺	+ 1e ⁻	=	Li	(Activos)	- 3.045

* Serie Electroquímica de Potenciales de Electrodo Respecto del Electrodo de Hidrógeno (H₂ / H⁺)

CUADRO N° 1

Una serie más práctica resulta utilizando un electrolito conocido (Agua de mar), metales y aleaciones utilizadas en ingeniería, y una celda de referencia fácilmente transportable (Cu-SO₄Cu), según lo cual se tiene el cuadro N° 2

Electrodo	Potencial (V)
Acero Inox. 304	0.15 Pasivo
Titanio Comercial	-0.17
Plata	-0.22
Acero Inox. 410	-0.22 Pasivo
Acero Inox. 316	-0.25
Acero Inox. 430	-0.28
70.30 Cu Ni - 0.47 % Fe	0.32
Cobre	0.43
Bronce Naval	0.47
Acero Inoxidable 410	-0.59 activo
Acero Inoxidable 304	-0.60 activo
Acero Inoxidable 430	0.54
Acero al Carbono	-0.68
Aluminio	-1.01
Zinc	1.10

* Serie Electroquímica de Potenciales de Electrodo Respecto del Electrodo Cobre Sulfato de Cobre

CUADRO N° 2

Las corrientes que producen corrosión

No sólo la corriente continua generada por proceso electroquímico en las celdas de corrosión es la que ocasiona en permanencia dicho deterioro, también las corrientes denominadas erráticas, que circulan por el suelo siguiendo circuitos diferentes al de la celda de corrosión incrementan sustancialmente el proceso al abandonar el electrodo hacia el suelo; cuadro N°3; además de lo cual existen otras corrientes muy corrosivas que se derivan del funcionamiento de aparatos con carga denominada "no lineal" tales como rectificadores, cargadores de baterías, UPSs etc.

Al lado de ellas las corrientes alternas de idéntica magnitud sólo ocasionarían el 1% de la corrosión, y aquellas de alta frecuencia apenas iniciarían el proceso en tal sentido. Las plantas industriales que tienen fuentes y cargas de corriente continua, propiciarán una mayor corrosión subterránea.

Metal	Peso Atómico	Estado Oxidación	Pérdida Kg / A - AÑO
ALUMINIO (Al)	26.98	3	2.99
COBRE (Cu)	63.57	2	10.48
HIERRO (Fe)	55.85	2	9.25
PLOMO (Pb)	207.20	2	34.27
MAGNESIO (Mg)	24.32	2	4.00
ZINC (Zn)	65.38	2	10.85

CUADRO N° 3

- Pérdida de peso por corrosión en Kg/Amp-Año de metales debido a las Corrientes erráticas.

La actividad en la celda de corrosión

Para que se posibilite la corrosión es necesario que se cumplan cuatro condiciones indispensables.

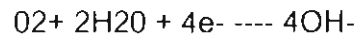
- Presencia de un ánodo y un cátodo.
- Una diferencia de potencial ánodo - cátodo.
- Una conexión directa ánodo - cátodo.
- Un medio común de inmersión ánodo - cátodo.

La celda elemental consta de dos electrodos inmersos en una solución, conectados externamente; el ánodo con exceso de electrones (cargas negativas), envía por un lado iones metálicos positivos (+) hacia el Cátodo, a través del electrólito, y por otro lado, electrones negativos (-) hacia el mismo cátodo, a través de la conexión directa; cuando los electrones y los iones positivos se encuentran en el cátodo, se neutralizan mutuamente (reducción) dando lugar al fenómeno de corrosión localizado en el ánodo.

Si la diferencia de potencial en un sistema común metal - electrólito, es mayor que la diferencia de potencial anodo-cátodo de las zonas de un mismo metal o de dos metales diferentes sólidamente unidos, se producirá corrosión o disolución del

metal en el ánodo, mientras que la reacción en el cátodo es generalmente la reducción del oxígeno, debido a que los electrolitos contienen oxígeno.

Si el pH de la solución fuese neutro o alcalino ($\text{pH} > 7$) se tendrá por ejemplo la corrosión del Fe,

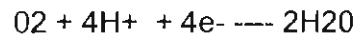


Si el pH de la solución fuese en cambio ácido ($\text{pH} = 1$), se producirá la reacción denominada Reducción

Protones:



Si el pH de la solución por el lado ácido estuviese próximo al punto neutro ($\text{pH} = 6$), es decir existe Oxígeno e Hidrógeno simultáneamente, la reacción será:



CAUSAS DE LA CORROSIÓN DE UN ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA.

La corrosión a través de micro celdas o macro celdas, también puede ocurrir en un mismo electrodo; será suficiente que aparezca entre dos partes cualesquiera de éste, una diferencia de potencial, lo cual puede ocurrir de varias maneras; se examinan las más conocidas:

a. Por diferencia de concentración de oxígeno

Está relacionada a la existencia de zonas desprovistas de oxígeno (anódicas), y otras con abundante oxígeno (catódicas), lo cual ocurre respectivamente en los puntos internos y externos de ajuste de las grapas de presión, ó en la superficie inferior y superior de los conductores tendidos en medio del relleno como electrodos horizontales o bien debido a la diferencia de gránulos de los estratos del suelo en contacto con los electrodos verticales.

b. Por existencia de sollicitaciones permanentes

Está relacionada a la existencia de zonas con tensión mecánica de tracción que presentan un comportamiento anódico y otras con sollicitación mecánica de compresión que se comportan como catódicas; lo cual ocurre generalmente cuando la instalación de los electrodos es por clavado en el suelo, en cuya penetración sufren desviaciones forzosas o deformaciones.

c. Por diferencia de resistividad del suelo

Origina una celda de conductividad diferencial, a partir de la existencia de rellenos no homogéneos o estratos del suelo con diferente resistividad en los que está

instalado un electrodo; en cuyo caso los rellenos o los estratos de baja resistividad son anódicos y aquellos los de mayor o alta resistividad son catódicos; lo cual ocurre generalmente en los suelos nivelados para los electrodos horizontales, y en los suelos comunes para electrodos verticales.

Examen de materiales alternos para los electrodos

Especialmente tratándose de la ejecución de puestas a tierra de protección que se caracterizan por su gran cobertura superficial y por su instalación en forma de redes tipo malla, en el pasado se examinaron diferentes materiales metálicos como alternativas competitivas con el cobre; cuya presencia origina la corrosión de estructuras de acero y tuberías de fierro instaladas conjuntamente en el suelo; en tales oportunidades, se desarrollaron estudios aplicados abarcando las consideraciones de orden técnico (fusión, resistencia, baja corrosividad) y económico (existencia en el mercado, bajo costo); dichos materiales básicamente fueron, el acero galvanizado, el acero inoxidable, el acero plaqueado con cobre y el aluminio anodizado.

Los modelos establecidos para dichas iniciativas de menor inversión y desempeño inicial equivalente al del cobre, no obstante, mostraron que con el tiempo su desempeño frente a la corrosividad de los suelos no era confiable.

Comparación de la corrosión de los materiales básicos

a. Caso del hierro

Muestra su inestabilidad en presencia del agua, y se corroe también en soluciones acuosas no oxigenables liberando hidrógeno; estas reacciones que son fuertes en medios ácidos, se apaciguan con el aumento del (pH) hasta cesar en un intervalo, en que el metal resulta cubierto de una capa de óxido; sin embargo, por sobre un (pH) superior a 13 las soluciones ya libres de agentes oxidantes resultan nuevamente corrosivas.

b. Caso del aluminio

Es un metal muy básico, y como su dominio de estabilidad esta por debajo de la del agua, en soluciones acuosas ácidas descompone el agua con evolución de hidrógeno, disolviéndose en iones metálicos e idénticamente en presencia de soluciones alcalinas, también descompone el agua disolviéndose en forma de iones de Aluminato AlO_2^- . En soluciones de (pH) entre 4 y 9 tiende a recubrirse de una capa de óxido protector Al_2O_3 .

c. Caso del cobre

Presenta dos zonas de corrosión referidas a los medios ácidos y alcalinos fuertes; en el medio ácido, con un (pH) por debajo de 5.4 el límite del dominio de corrosión

es una línea horizontal, al aumentar el (pH) se produce un cambio de dirección con el inicio de formación de una capa de Cu_2O que protege al metal, formándose adicionalmente $\text{Cu}_2(\text{OH})_2$ y CuO . Cuando el (pH) sobrepasa 11.6, los hidróxidos y óxidos no mantienen su estabilidad y se disuelven dando lugar a la aparición de una segunda zona de corrosión.

La evaluación conjunta muestra la supremacía del cobre que no se corroe liberando hidrógeno (H_2) alrededor del (pH) neutro, mientras que el hierro y el aluminio sí son susceptibles de ello; asimismo presenta una pequeña zona de corrosión pero con potenciales mayores en el lado alcalino, donde el hierro tiene un desempeño aceptable en un rango de potenciales menores y el aluminio es totalmente vulnerable; finalmente la nobleza del cobre se verifica a través de la amplia parte común de su zona de inmunidad con la zona de estabilidad termodinámica del agua, lo cual no se da para el hierro ni para el aluminio.

Consecuentemente, si se espera larga duración en la práctica no resultará conveniente el uso de otros materiales para los electrodos de puesta a tierra, aunque estos estuviesen protegidos por un plaqueado de cobre, dado que al corroerse dicha placa en suelos que contienen sales de amoníaco (tierra de cultivo), cloruros, sulfuros y agentes oxidantes el acero interior se disolverá aceleradamente rompiendo las paredes de cobre.

CÓMO PARTICIPA EL SUELO O EL RELLENO EN LA CORROSIÓN

Los suelos o los rellenos húmedos constituyen un electrólito complejo en el cual la corrosión puede variar de un punto a otro en la superficie del electrodo de puesta a tierra, debido a las diferencias de potencial entre áreas adyacentes que crean celdas de corrosión y controlan las tasas de corrosión: ello se origina según existan:

- Diferentes contenidos de humedad.
- Diferentes concentraciones de oxígeno.
- Diferentes resistividades entre zonas adyacentes.
- Contenidos salinos.
- Concentración de iones hidrógeno.
- Gradientes de temperatura.
- Esfuerzos internos de la aleación del electrodo.
- Tratamiento térmico superficial del electrodo.

Los suelos de baja resistividad normalmente permiten altas tasas de corrosión, la humedad en este caso juega un rol importante, debido al contenido y tipo de los elementos que producen iones libres en el electrólito.

La cinética de la corrosión en el suelo

La concentración de iones libres de hidrógeno (pH) y el oxígeno disuelto participa en el proceso de control de la corrosión; un electrólito ácido ($\text{pH} < 7$) contiene exceso de iones hidrógeno que promueven la neutralización de los electrones e incentivan el flujo de corriente de corrosión; de ese modo, las partes del electrodo

que se hallan en la zona ácida del electrolito son anódicas respecto de aquellas que se hallan en una zona de (pH) mayor.

Un subproducto de la corrosión es la acumulación de una capa gaseosa de hidrógeno en la superficie catódica (por donde ingresa la corriente de corrosión); ésta polarización catódica interviene reduciendo espontáneamente la corriente de corrosión, constituyendo una barrera aislante; sin embargo, el oxígeno disuelto en el electrolito puede reaccionar con el hidrógeno, para volver a formar agua, actividad que destruye la capa polarizante y permite que la corrosión continúe, el resultado es que las áreas que tienen alta disolución de oxígeno, tienden a ser catódicas.

El control de la corrosión en el suelo

El examen del funcionamiento de las celdas de corrosión sugiere métodos propios de mitigación o reducción de daños, los cuales mayormente se basan en la minimización de las corrientes de corrosión (corrientes que abandonan el electrodo), lo cual contradice el funcionamiento de la puesta a tierra cuyo electrodo principalmente debe conducir y dispersar corrientes de todo tipo, tanto en permanencia como ocasionalmente, por lo que prácticamente **sólo hay tres alternativas** viables para la preservación de los electrodos de aterrizaje sin menoscabo de la evacuación y dispersión de corrientes.

Utilizar materiales altamente resistentes a la corrosión, tales como el cobre, acero inoxidable o aleaciones de níquel o titanio, descartando los metales (activos) y los metales (anfoterós).

Utilizar en los lechos de instalación, rellenos estables de (pH) neutro y a la vez conductivos e impermeables a la migración de sales corrosivas, tales como la bentonita.

Utilizar protección catódica.

Descartando el uso de la protección catódica sobre todo tratándose de pequeños sistemas de puesta a tierra, sólo quedarían las posibilidades de uso de electrodos resistentes a la corrosión y rellenos conductores estables y neutros, exigencias difíciles de cumplir estrictamente pero si en forma aproximada, y con posibilidad de aplicarse conjuntamente para obtener un óptimo resultado a largo plazo.

El desempeño del acero inoxidable como electrodo

Actualmente constituye el único material técnica y económicamente competitivo con el cobre en relación al desempeño frente a la corrosión que es exigible para los electrodos de puesta a tierra; no obstante es menester mencionar las condiciones bajo las cuales dicho material cumple con sus prestaciones, y cuando éstas no se dan, en qué forma sufre los deterioros.

Tiene un óptimo desempeño en la atmósfera, debido a que dispone del oxígeno que requiere para mantener su capa protectora de óxido; pero al estar enterrado la

aireación de su superficie se ve limitada o es mínima, por lo que necesitaría estar inmerso en un electrólito (relleno) especial que actúe en permanencia como oxidante.

Toda ausencia de oxígeno, aún en forma localizada en la superficie del electrodo, origina una zona anódica en la que se inicia el proceso de corrosión por picadura que se autoincentiva al ir reduciendo cada vez más el (pH) interior, mientras que en el exterior se mantiene la zona catódica alcalina protectora, hasta que se produce la rotura física del electrodo.

En el caso del cobre, la capa protectora de óxido es dura y a menos que sufra una rotura, no necesita renovarse porque resiste al ataque corrosivo de las sales comunes del suelo, a excepción de los compuestos fertilizantes que contienen amoníaco o de los sulfuros, en cuyo caso el proceso corrosivo es de cobertura extensa y muy lento.

Los electrodos de acero con plating de cobre, sufren una violenta corrosión interna y destrucción total, al ser perforada dicha capa por corrosión en las partes más débiles, lo cual ocurre en pocos años debido al uso de sales conductoras (Geles) aplicadas directamente sobre el electrodo.

REFERENCIAS

1. - IEEE Green book. Grounding of industrial and Commercial Power Systems
2. - IEEE White Book. Electric Systems in Health Care Facilities
3. - SIEMENS, Volumen 1 Electrical Installations Handbook
4. - Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas
Parte 1, instalaciones para el uso de Energía Eléctrica SCFI
5. - J.R. Eaton, Grounding Electric Circuits Effectively
6. - James G. Biddle Co. Getting down to earth, Plymouth Meeting, Penn. 1967.
7. - E.B. Curdts, "Let's be more specific about Equipment Grounding". American Power Conference Transactions, 1962. G.E. Buletín, GER-1974.
8. - Compañía de Luz y Fuerza del Centro "Cálculo de Redes de Tierra".
9. - LEM Instruments, Inc. Electrical grounding techniques
10. - Técnicas para la conexión a tierra de instalaciones en atmósferas explosivas I.P.N., Nava Alfredo
- 11.- <http://www.laguiaelectrica.com>
- 12.- IEEE std 81-1983
IEEE Guide for measuring Earth Resistivity, ground impedance and Earth Surface potential of Ground Systems

- 13.- IEEE std 142-1983
IEEE Recommended Practice for Ground of Industrial & Commercial Power
Systems
- 14.- AEMC Test Equipment Guide
Edition 3.1
Biddle instruments
- 15.- <http://www.superiorgrounding.com/soils.html>
- 16.- Aterramiento y protección contra relámpagos
para Sistemas de Energía Eléctricos-Solares
Windy Dankoff
- 17.- Seguridad en el Diseño de Redes de Distribución Eléctrica
Yanque M. Justo
- 18.- Procobre México

TIERRA FÍSICA. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

SE TERMINÓ DE IMPRIMIR EN EL MES DE
ABRIL DE 2009 EN LOS TALLERES DE LA SECCIÓN
DE IMPRESIÓN Y REPRODUCCIÓN DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

SE IMPRIMIERON 100 EJEMPLARES
MÁS SOBRANTES PARA REPOSICIÓN

LA EDICIÓN ESTUVO A CARGO DE LA
SECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN EDITORIALES
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO



Formato de Papeleta de Vencimiento

El usuario se obliga a devolver este libro en la fecha
señalada en el sello mas reciente

Código de barras. 2893105

FECHA DE DEVOLUCION

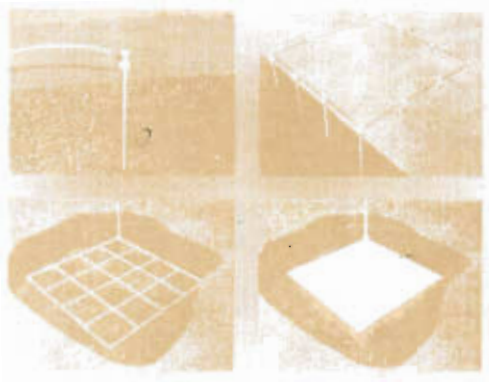
- Ordenar las fechas de vencimiento de manera vertical.
- Cancelar con el sello de "DEVUELTO" la fecha de vencimiento a la entrega del libro

UAM
TK260
C3.75

2893105
Cardiel Pérez, Eladio
Tierra fisica : sistemas



2893105



TIERRA FISICA SISTEMAS DE PUESTO A TIERRA
CARDIEL * SECCION DE IMPRESION

35386

R. 40



\$ 10.00

40-ANTOLOGIAS CBI * 01-CBI

ISBN: 970-654-847-5



978-97065-48474

UNIVERSIDAD
AUTONOMA
METROPOLITANA
CASA ABIERTA AL TIEMPO **Ascapotzalco**

División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Departamento de Electrónica

Coordinación de Extensión Universitaria
Sección de Producción y Distribución Editoriales