DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

INGENIERÍA ELÉCTRICA.

RESIDENCIA PROFESIONAL

PROYECTO A REALIZAR:

MEDICION DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN GASOLINERAS

INTEGRANTES:

LUIS ARMANDO DIAZ ESCOBAR

ASESOR EXTERNO:

ING. DAVID MANDUJANO ROMAN

ASESOR INTERNO:

ING. ARIOSTO MANDUJANO CABRERA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, DICIEMBRE DE 2019

Agradecimiento

A mis padres, por apoyarme en todo momento durante mi etapa de formación académica, pero sobre todo por haberme inculcado los valores y principios primordiales.

A mis hermanos, por estar siempre al pendiente de mis pasos, y por ser una fuente de inspiración constante para superarme día con día.

A mis seres queridos, por depositar su confianza en mí, y por tener siempre buenos deseos.

Brindo este trabajo a todas aquellas personas que han sido mis cómplices a lo largo de este largo camino, ya que el día de hoy se concreta una meta muy importante para mí.

A todos los que han compartido algunos minutos de su tiempo en observar y aportar sus comentarios a este trabajo.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 **ANTECEDENTES** 2
1.2 **ESTADO DEL ARTE** 4
1.3 **JUSTIFICACIÓN** 5
1.4 **OBJETIVO** 6
1.5 **METODOLOGÍA** 7
2. FUNDAMENTO TEORICO 8
2.1 **LA TIERRA Y LA RESISTIVIDAD** 8
2.2 **RESISTIVIDAD DEL SUELO** 9
2.3 **RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL (PS)** 10
2.4 **FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO** 11
2.5 **MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO** 15
2.6 **INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO** 16
2.7 **MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO** 20
2.7.1 **método de wenner** 20
2.7.3 **Método de medición de resistencia de una varilla** 23
2.8 **TIPOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA** 24
2.8.1 **Puesta a tierra para sistemas eléctricos** 24
2.8.2 **Puesta a tierra de los equipos eléctricos** 25
2.8.3 **Puesta a tierra en señales electrónicas** 25
2.8.4 **Puesta a tierra de protección electrónica** 25
2.8.5 **Puesta a tierra de protección atmosférica** 26
2.8.6 **protección a tanques** 27
2.9 **TENSIÓN DE PASO** 27
2.10 **Tensión de contacto** 29
2.11 **Tensiones Reales de Paso y de contacto** 31
2.12 **Efectos fisiológicos del pasaje de la corriente por el cuerpo Humano** 32
2.13 **VALORES RECOMENDADOS POR NORMAS** 33
2.14 **CONFIGURACIONES TÍPICAS DE TIERRA** 33
2.15 **VENTAJAS DEL USO DE SISTEMAS COMBINADOS DE VARILLAS HORIZONTALES Y CONDUCTORES VERTICALES** 34
2.16 **FUNCIONES DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA** 35
2.17 **GEOMETRÍA DE LA MALLA** 35

2.18 **REQUISITOS DE UNA MALLA A TIERRA** 35
2.19 **CONFIGURACIÓN EN MALLA O RED** 36
2.20 **CÁLCULO DE CONDUCTOR PARA UNA MALLA** 36
2.21 **Valor de la resistencia de Puestas a Tierra** 39
2.21.1 **Método de Laurent y Niemann** 39
2.21.2 **Método de Dwight** 40
2.22 **diseño de una malla** 42
2.23 **NATURALEZA DE UN ELECTRODO A TIERRA** 44
2.24 **ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE TIERRA** 44
2.24.1 **Electrodos de Puesta a Tierra** 44
2.24.2 **ANILLO DE TIERRA** 45
2.24.3 **ELECTRODOS DE VARILLA O TUBERÍA** 45
2.24.4 **ELECTRODOS DE PLACA** 47
2.24.5 **ESTRUCTURAS METÁLICAS ENTERRADAS** 47
2.24.6 **ELECTRODOS PARA PUESTA A TIERRA EN RADIO FRECUENCIA** 47
2.24.7 **BARRA DE EQUIPOTENCIAL** 47
2.25 **ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA** 49
2.26 **CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA** 49
2.27 **METODOS DE PRUEBA BASICOS PARA MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA** 50
2.27.1 **Método de caída de potencia** 51
2.27.2 **Método de Dos Puntos** 53
2.27.3 **El método de medida en triángulo (dos picas)** 55
2.27.4 **La medida de tierra por método de 4 polos** 56
2.27.5 **la regla de 62%** 56
2.28 **METODOS INVOLUCRADOS EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE TIERRA** 58
2.29 **MÉTODOS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE TIERRA** 60
2.30 **TRATAMIENTO QUÍMICO DEL SUELO** 61
2.31 **MÉTODO DE TRINCHERAS PARA LA PREPARACIÓN DEL TERRENO** 62
2.32 **MATERIALES ACEPTABLES DE BAJA RESISTIVIDAD** 64
2.33 **EFECTO DEL TAMAÑO DEL ELECTRODO** 66
2.31.1 **Efectos por el diámetro del electrodo** 67
2.31.2 **Uso de electrodos múltiples** 68

2.34 **CONECTORES Y ACCESORIOS PARA LA RED DE TIERRAS** 69
2.28 **Tipos de conectores y accesorios** 70
2.29 **Consideraciones para selección** 71
3. DESARROLLO 72
3.1 **Recomendaciones prácticas para la medición de Resistividad** 72
4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN 81
5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 82
6. ANEXOS 84

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Diagrama simplificado para entender el concepto de resistividad del suelo 9
Ilustración 2 Estratificación del suelo 15
Ilustración 3 método de medición wenner 21
Ilustración 4 Método de SchlumbergerPalmer 23
Ilustración 5 puesta a tierra de protección electrónica 26
Ilustración 6 tensión de paso 28
Ilustración 7 tensión de contacto 30
Ilustración 8 diseño de una malla 43
Ilustración 9 naturaleza de un electrodo de tierra 44
Ilustración 10 electrodo de varilla o tubería 46
Ilustración 11 barra de equipotencial 48
Ilustración 12 método de caída de potencia 52
Ilustración 13 método de dos puntos 54
Ilustración 14 método medida de triangulo 55
Ilustración 15 método de medida de 4 polos 56
Ilustración 16 regla del 62% 57
Ilustración 17 representación de conexión de amperímetro y voltímetro 59
Ilustración 18 representación gráfica e ilustrativa 60
Ilustración 19 método de trincheras para la preparación del terreno 63
Ilustración 20 uso de electrodos múltiples 69

Lista de fotografías

fotografía 1 des tapamiento de registros 73
fotografía 2 conexión de puntas 73
fotografía 3 medición del primer registro 74
fotografía 4 resultado 74
fotografía 5 medición segundo registro 75
fotografía 6 destapa miento del tercer registro 76
fotografía 7 tercera lectura de medición 76
fotografía 8 tercera medición con equipo celmec 77

Lista de tablas

Tabla 1 Constantes de los materiales conductores dado por la IEEE-80. 38
Tabla 2 Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra IEE-80 39
Tabla 3 calibre de conductor de puesta a tierra 50
Tabla 4 datos de impedancia 57
Tabla 5 resistencia del suelo 62

Lista de graficas

grafica 1 Resistividad del suelo en función de la temperatura. 12
grafica 2 Resistividad del suelo en función de la concentración de sales disueltas 13
grafica 3 Resistividad del suelo en función del tipo de sales 14
grafica 4 Resistividad del suelo en función de la humedad 14
grafica 5 método grafico de sunde 20
grafica 6 curva de resistividad típica 22
grafica 7 tensión de paso 29
grafica 8 pendiente de tagg 58
grafica 9 efecto del tamaño del electrodo 67
grafica 10 resistencia en % respecto al diámetro de la barra copperweld 68

Anexos

Anexo 1 informe de resistencia de puesta a tierra con amperímetro de gancho 84
Anexo 2 registro de medicion con amperímetro de gancho 84
Anexo 3 formato de campo por el método completo 85
Anexo 4 registro de mediciones 85
Anexo 5 formato de campo con el método pendiente 86

MEDICIÓN DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN GASOLINERAS

1. INTRODUCCIÓN

Una gran parte de los accidentes personales, debidos a causas eléctricas, están relacionados con el contacto directo con carcazas 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.

También los sistemas de puesta a tierra son utilizados en la estación generadora, las líneas y los cables que distribuyen la energía eléctrica y los locales en los cuales se utiliza. La necesidad de esta conexión se considera sagrada en la legislación.

Antes de exponer definiciones, es importante notar que, Norte América es más común el término «grounding». La definición de la IEEE de puesta a tierra es:

«Tierra (sistema de tierra). Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra».

También la Norma Eléctrica Americana (National Electric Code, NEC por sus siglas en inglés) 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."

Por puesta a tierra generalmente entendemos una conexión eléctrica a la masa general de la tierra, siendo esta última un volumen de suelo, roca etc., cuyas dimensiones son muy grandes en comparación al tamaño del sistema eléctrico que está siendo considerado.

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.

1.1 **ANTECEDENTES**

Las gasolineras o estaciones de servicio, nos brindan gasolina y hay estaciones de servicio en todas partes de la republica mexica, por eso hoy en día son muy importante para el uso automóviles que funcionan con combustible derivado del petróleo, las estaciones nos brindan gasolina para el funcionamiento de los automóviles.

Al principio las farmacias fueron los primeros lugares donde se comercializo la gasolina, con el paso del tiempo se fueron creando lo que hoy se conoce como estaciones de servicio o gasolineras y con el paso de los años han evolucionado cada día más. En la actualidad existen alrededor de 12 mil gasolineras.

La primera estación fue construida en 1907 por la empresa Standard oil of California (hoy en día llamada ChevronTexaco) en la ciudad de Seattle, en el estado estadounidense de Washington. Esta compañía fue la que comenzó a poner avisos con logos en las rutas, publicitando sus estaciones de servicio.

En México, al ser la paraestatal Pemex la que controla todo el petróleo, hay una infinidad de tipos de estaciones de servicio. Por ejemplo, en las ciudades grandes (como la Ciudad de México) hay una gasolinera en casi cada esquina con distintos formatos dependiendo de la zona de la ciudad en la que se encuentre esta misma y muy modernizada mientras que en algunos pueblos (como San Cristóbal de las Casas, Chiapas) hay gasolineras únicamente en carreteras y son algo arcaicas, Aunque ya todas las estaciones poseen bombas digitales algunas recientes y otras de atrasada tecnología, pero casi todas ya son digitales

En una estación de servicio es importante definir todos y cada uno de los puestos que hay en la empresa, ya que el correcto funcionamiento de ésta depende de la delimitación del trabajo de cada empleado. En una gasolinera existe un término conocido como “zona de riesgo”, que se define como la protección del lugar donde se labora tanto de instalaciones como del capital humano.

Dentro de una empresa existen diferentes áreas de trabajo que se dividen en distintos puestos. En el lado operativo encontramos a los oficiales encargados de la venta de los petrolíferos, en el área de mantenimiento, se encuentran los encargados de limpieza y el encargado de la estación, en el departamento de contabilidad y finanzas se cuenta con la supervisión de los gerentes generales.

actualmente algunas gasolineras ya cuentan con un distintivo de calidad denominado Pemex Cualli el cual le indica al usuario final que esa estación de servicio es 100% confiable en cuanto al precio y procedencia del producto, formas de pago adicionales como tarjetas de consumo, vales tarjeta de débito y crédito, controles estrictos de volumen, surtidores de nueva tecnología aprobada por la ley vigente entre otras medidas las cuales hoy en día intentan recobrar la confianza en el consumidor Mexicano.

Los dispensadores de gasolina deben de contar con un buen sistema de tierra, ya que esto ayuda a tener una mayor seguridad ante cualquier falla, el origen de este tipo de protección se oficializó a principios del siglo pasado. A partir de 1913, el National Electrical Code

(NEC) obligó a que los sistemas eléctricos con una tensión mayor a 150 volts, medidos de fase a tierra, fueran puestos a tierra.

A pesar del alto riesgo que se tienen en las gasolineras, provocar un corto circuito, por eso es muy indispensable contar con un buen sistema de tierra y tener toda la zona aterrizada para no tener una diferencia de potencial y, a si tener asegurado a su personal y asimismo a los clientes.

No obstante, de que la tierra ha sido elemento eléctrico desde hace millones de años, tanto su reconocimiento como su utilización en los sistemas técnicos construidos por el hombre son muy recientes. Para las primeras civilizaciones la única manifestación eléctrica perceptible, la electricidad atmosférica, estuvo siempre ligada a las supersticiones, a la mitología y a la religión.

Las primeras aproximaciones que se hicieron al estudio de las puestas a tierra fueron ecuaciones analíticas que permitían calcular el valor de la resistencia de puesta tierra de configuraciones sencillas y fue de allí que, dada la complejidad matemática para representar diseños más complejos, se empezaron a utilizar las ecuaciones de campos electromagnéticos: primero en forma estática y luego de forma transitoria, implementándolas en programas de computador capaces de diseños complejos y tiempos de cálculo reducidos.(Jony montaña)

A causa de la necesidad que tienen las gasolineras, de tener un buen sistema de tierra, para seguridad de todo su personal, razón por la cual nos llevó a formular lo siguiente:

¿Cómo mejorar la medición de sistemas de puesta a tierra en gasolineras, para tener una mayor seguridad del personal y la sociedad?

1.2 **ESTADO DEL ARTE**

En la actualidad los sistemas de puesta a tierra de instalaciones eléctricas están relacionada en primer lugar con la seguridad. El sistema de puesta a tierra se diseña normalmente para cumplir dos funciones de seguridad. La primera es establecer conexiones equipotenciales. Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores de conexión eléctrica. (sistema de puesta atierra, 2016, pág. 5)

La segunda función de un sistema de puesta a tierra es garantizar que, en el evento de una falla a tierra, toda corriente de falla que se origine, pueda retornar a la fuente de una forma controlada. Por una forma controlada se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas. (sistema de puesta a tierra, 2016, pág. 5)

El día de hoy, de diferentes formas, todas las personas nos vemos involucradas con la electricidad. En nuestras casas u oficinas, estamos en constante relación con ella. Entender su comportamiento y aplicaciones aporta conocimiento relevante. La puesta a tierra en sistemas eléctricos es una de las tantas formas de protección existentes, ya que se puede orientar hacia la protección de equipos eléctricos, señales electrónicas o protección atmosférica. (Revista: energy management,2017)

Actualmente, la tecnología de estado sólido, basada en electrónica moderna, sigue evolucionando y se hace más sensible a los ruidos eléctricos y a la contaminación electromagnética, lo que precisa de un sistema de puesta a tierra libre de ruidos y compatibilidad electromagnética de todos los equipos y sistemas. La puesta a tierra de sistemas eléctricos limita cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos. Para ello se utiliza un conductor apropiado que se conecta a la tierra. (Revista energy management, 2017)

El día de hoy, es común encontrarse con instalaciones eléctricas para alimentar muchos aparatos eléctricos, fijos y móviles; con estructuras susceptibles de deterioro desde el punto de vista eléctrico, haciendo fundamental la protección contra fallas de aislamiento que originan la aparición de tensiones por contactos indirectos. Las tensiones por contacto indirecto se originan en las estructuras metálicas de los equipos eléctricos, cuando un conductor o terminal energizado, ante la pérdida de aislamiento, establece contacto con la estructura metálica energizando a esta. (revista electro industria, 2016)

Lo que aquí se propone como proyecto es dar una mayor calidad al sistema de tierra en gasolineras, ya que los sistemas de tierra limitan los riesgos, permite ahorrar en gastos, asegurar un mejor rendimiento y proporciona seguridad al personal y público en general.

1.3 **JUSTIFICACIÓN**

El presente proyecto, tiene como objetivo la propuesta de tener una mayor seguridad en las gasolineras, esto se implementará a base de una auditoria y llevar acabo mediciones de tierra en las gasolineras y donde no tengan los sistemas de tierra, procedería a construir un sistema de tierra, con la finalidad de tener una mayor eficiencia de la calidad de la energía, y así estar ala vanguardia de las nuevas tecnología y protocolos de seguridad en instalaciones eléctricas de gasolineras.

En las gasolineras el riesgo eléctrico no está vinculado de manera directa a lo que normalmente se entiende como riesgo eléctrico directo, sino que está relacionado con la electricidad estática, un tipo de electricidad que no se ve, y muchas veces no se contempla, pero que puede generar accidentes muy graves, y más aún en una estación de servicio.

La electricidad estática representa un desequilibrio en la repartición de las cargas por transferencia de electrones entre dos materiales que han interactuado, creándose una perturbación en el espacio que rodea a dichas cargas que se llama campo eléctrico y, por tanto, una diferencia de potencial entre ellas.

El parámetro que determina la peligrosidad de una chispa es la cantidad de energía liberada cuando esta tiene lugar, que se manifiesta en forma de radiaciones ópticas, ionización y calor; este último factor es generalmente el desencadenante de la combustión: cuando las chispas se producen en una atmósfera inflamable de gases y/o vapores, es relativamente fácil que se inicie el incendio, porque la energía liberada suele ser superior a la energía mínima de inflamación (EMI) o energía de activación (eA) de la mezcla gas/vapor + aire.

De este modo, los gases o vapores se clasifican en 4 grupos: I, II A, II B y II C4. Se puede presumir la posibilidad de una inflamación efectiva si la chispa se genera debido a una diferencia de potencial superior a 1.000 V[5].

Cuando las chispas se producen en una atmósfera inflamable de polvo, la probabilidad de que se inicie la ignición suele ser más baja porque, por lo general, la energía mínima de inflamación de la mezcla es más elevada que en el caso de los gases y/o vapores, del orden de 1 a 1000 mJ, de modo que la mayoría de las descargas electrostáticas no son capaces de iniciar la ignición.

El fenómeno de la ignición de atmósferas explosivas debe combinarse con la efectiva presencia y concentración de la sustancia combustible en el aire; para ello, se han definido los límites de explosividad:

- Límite Inferior de Explosividad (LIE): es la concentración mínima de sustancia en el aire por debajo de la cual una explosión no es posible.
- Límite Superior de Explosividad (LSE): es la máxima concentración de sustancia en el aire por encima de la cual una explosión no es posible.

De forma intuitiva, se puede decir que por debajo del LIE la mezcla es “demasiado pobre” para arder (pues hay poco combustible) y por encima del LSE es “demasiado rica” para arder (ya que hay poco oxígeno). Los límites de explosividad delimitan el denominado “rango explosivo”.

Por otra parte, dentro del rango explosivo no todas las concentraciones tienen la misma susceptibilidad a la ignición para una energía determinada; así, se define la concentración más fácilmente inflamable (CMFI) como aquella concentración de la mezcla que la hace más susceptible de arder en presencia de una descarga electrostática. La CMFI suele aproximarse al punto medio entre el LIE y el LSE y es la que determina la energía mínima de inflamación (EMI) de la mezcla.

Sin duda es el riesgo más importante y que deberemos de combatir con un adecuado Plan de Autoprotección para Gasolineras, así como un Documento de Protección Contra Atmósferas Explosivas ATEX de la estación de servicio.

Los combustibles presentes en todas las estaciones de servicio implican un gran riesgo intrínseco de incendio y de explosión. Los vapores de la gasolina son más pesados que el aire y pueden recorrer grandes distancias, con lo que están en disposición de alcanzar fuentes de ignición con suma facilidad, una vez liberados en las operaciones de llenado, por derrame o rebosamiento. Para controlar el riesgo, hay que garantizar una ventilación adecuada de los locales cerrados para conseguir disipar estos vapores y reducir la concentración de los mismos

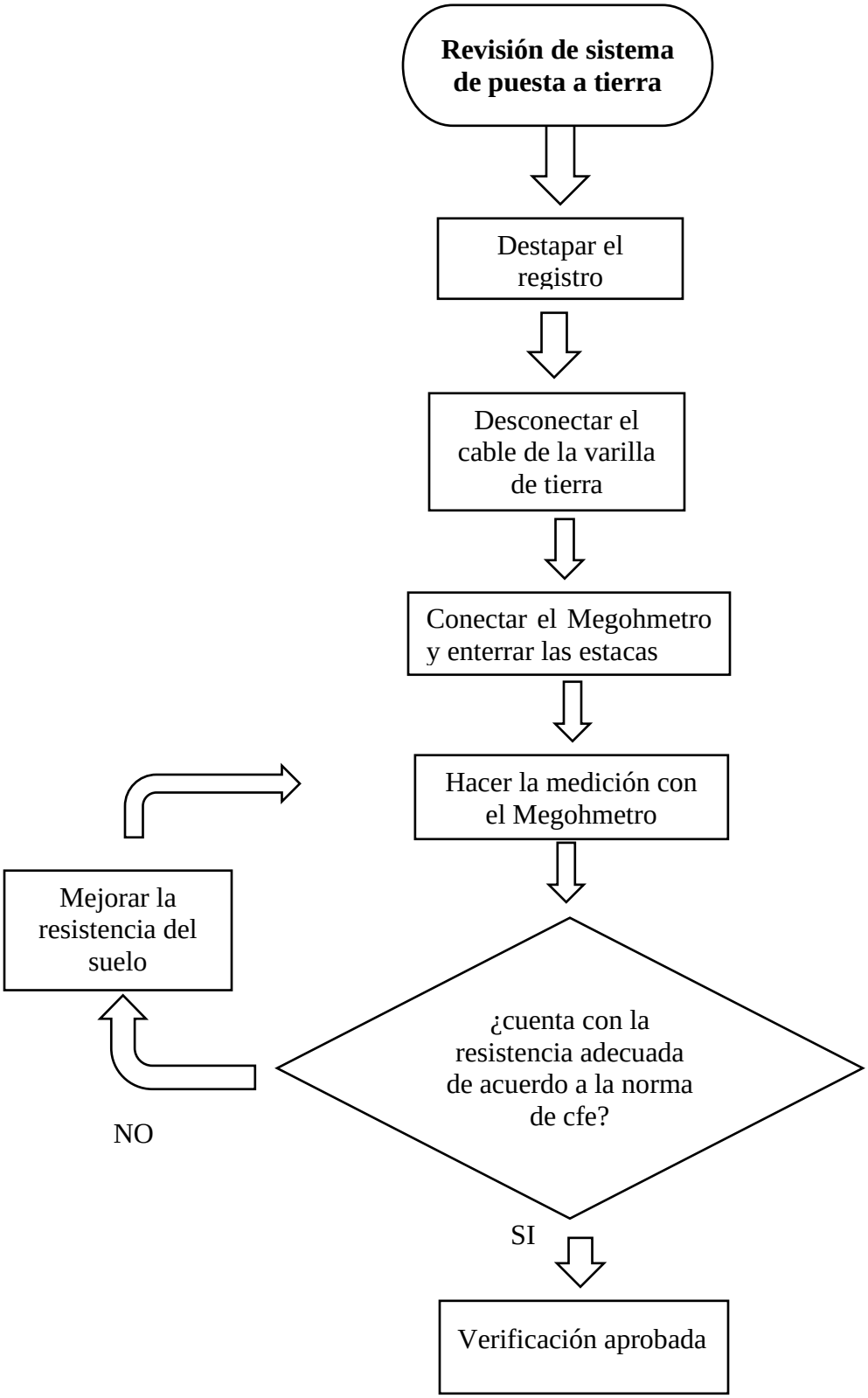
De acuerdo con un estudio de la Federación de Colegios de Ingenieros Mecánicos, Electricistas, Electrónicos y de Ramas Afines de la República Mexicana A.C. (FECIME), basado en información del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), en 2009 se presentaron 560 muertes por electrocución en el país. La mayoría de estos accidentes hubieran podido ser evitados con el conocimiento básico de una puesta a tierra adecuada.

Por eso la importancia de realizar el siguiente proyecto de hacer mediciones de sistemas de puesta a tierra en gasolineras, y además tener una mayor seguridad ante la sociedad, asimismo poder bajar el índice de mortandad por electrocución.

1.4 **OBJETIVO**

El propósito principal es garantizar la seguridad de las personas ante contactos indirectos, y además poder evitar riesgos a la sociedad, para poder vivir más tranquilo y tener mayor seguridad, ante todo.

1.5 **METODOLOGÍA**



2. FUNDAMENTO TEORICO

2.1 LA TIERRA Y LA RESISTIVIDAD

Los sistemas de conexión a tierra pueden ser simples como una barra vertical enterrada a ras del terreno o un conductor horizontal enterrado a una profundidad determinada; o complejos como las mallas de conexión a tierra de las subestaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Todas las instalaciones eléctricas en general están conectadas intencionalmente a tierra en un área del terreno especialmente acondicionada para ello a través de lo que se conoce como Sistema de Conexión a Tierra, en forma abreviada: SCT. Las funciones del SCT son diversas, entre las fundamentales está la protección de las personas contra choques eléctricos. El diseño de los SCT requiere como información fundamental el conocimiento de la respuesta eléctrica del terreno donde se va a instalar.

Un parámetro fundamental que caracteriza la respuesta eléctrica de un terreno es la resistividad del mismo. La resistividad del terreno es el parámetro sobre el cual se fundamenta el diseño de los SCT para su operación en régimen permanente de corriente continua o de 60 Hz. En consecuencia, su conocimiento es indispensable al momento de proponer un diseño o esquema de SCT para una instalación determinada.

La resistividad ρ es un parámetro característico de los medios conductores su unidad en el sistema SI es el Ω (OHM). El parámetro inverso la conductividad σ se expresa en Siemens/m. En un medio conductor homogéneo, isotrópico, el valor de la resistividad es igual en cualquier punto y dirección del medio. En el caso real de un terreno en cualquier parte del mundo es muy difícil, si no imposible, considerar éste homogéneo.

La naturaleza propia de su constitución y por estar sometido a los efectos climáticos hacen, que aun en el caso de tener un terreno constituido por un solo material existan variaciones de su resistividad respecto a la profundidad, principalmente por la variación del nivel freático y del grado de compactación del material.

La resistividad del suelo depende de:

- Tipo de suelo
- El porcentaje de humedad
- Su composición química
- La compactación del material
- La temperatura • Estratificación del suelo
- La mezcla de diferentes tipos de materiales
- Composición química y concentración de las sales disueltas en la humedad del suelo

En la NOM-022-STPS-1999 se define el término resistividad, como la resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de un metro por lado.

De acuerdo con la NOM-008-SCFI-1993, Su representación dimensional debe estar expresada en Ohm-m, cuya acepción es utilizada internacionalmente.

2.2 **RESISTIVIDAD DEL SUELO**

La resistencia que presenta un terreno está en función de la resistividad del mismo y de las dimensiones y la forma del electrodo, y aunque se considere la tierra como un conductor de ilimitada conductancia por sus grandes dimensiones, no puede asumirse que las "conexiones" que a ella se efectúen mediante electrodos (conseguidas de una forma bien distinta a la que se utiliza de manera común, y en donde falta la presión externa entre los dos medios a interconectar) tengan esa misma propiedad, ya que cualquiera que sea la forma que presenten, ofrecerán una resistencia definida al paso de la corriente y, en muchos casos, resultará difícil obtener una puesta a tierra de baja resistencia.

Como definición, la resistividad eléctrica o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga un área con sección transversal y longitud unitarias.

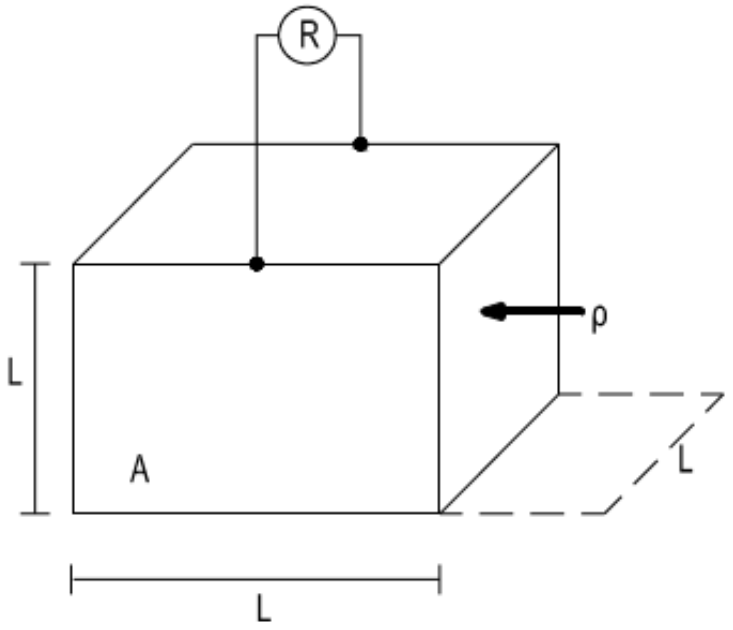


Ilustración 1 Diagrama simplificado para entender el concepto de resistividad del suelo

De la ecuación:

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

Despejando:

$$\rho = R\frac{A}{L} = ohms\frac{m^2}{m} = ohms \cdot m$$

Donde:

- ρ= Resistividad del suelo en Ohm-metro (Ω-m)
- R = Resistencia en Ohm (Ω)
- A = Área de la sección transversal en m2
- L = Longitud en m.

2.3 RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL (PS)

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo. Una capa superficial con un espesor (hS) entre 0.15m ≥ hS ≥ 0.1m de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla, y del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad del orden de 5000 Ω-m > ρS > 2000 Ω-m. Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m, disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

Se introduce aquí el factor de disminución de la capa superficial (CS), que puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de CS; sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de CS , Este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico.

$$C_S = 1 - \frac{0.09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_S}\right)}{2h_S + 0.09}$$

Dónde:

- C_S → Factor de disminución de la capa superficial.
- ρ → Resistividad del terreno (Ω-m).
- ρ_S → Resistividad de la capa superficial (Ω-m).
- h_S → Espesor de la capa superficial.

La norma también define el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes como:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

2.4 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

La conductividad eléctrica de los materiales que constituyen la superficie de la tierra es muy baja comparada con la alta conductividad de los metales.

Esto se explica al analizar la composición y propiedades del suelo. En general, existen dos elementos principales en la tierra, óxido de silicio y óxido de aluminio, que en realidad son excelentes aisladores, y la conductividad de la tierra se debe en gran medida a las sales y humedad contenidas en estos aisladores. Debido a esto, la tierra se considera como un aislador imperfecto.

No obstante, estas condiciones, el suelo puede conducir una cantidad de corriente considerable debido a que la sección transversal de éste es suficientemente grande, y prácticamente se puede decir que no presenta limitaciones.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro aún dentro de un mismo sitio. En general, los factores que modifican la resistividad del terreno pueden resumirse en los siguientes:

- La composición.

- El estado higrométrico.

Es la humedad relativa del aire, la relación entre el vapor de agua realmente contenido en el aire.

- 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.

Para cuestiones de resistividad, también es de interés obtener las características higroscópicas (absorción y de retención del agua) de los granos en cuestión.

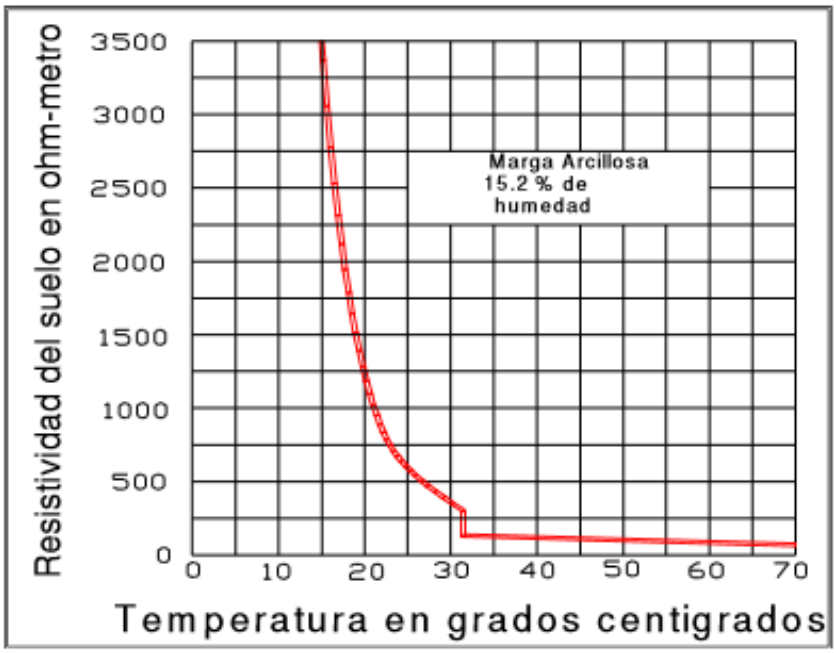
- La compactación.

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles.

El grado de compactación altera el valor de la resistividad, debido al grado de unión de los granos, cuando la compactación del terreno es grande, la resistividad disminuye.

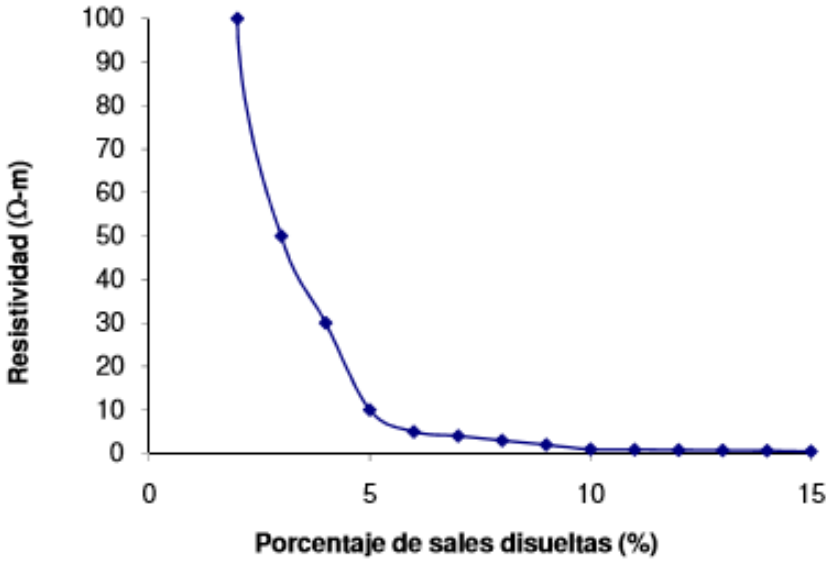
- La temperatura.

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura.



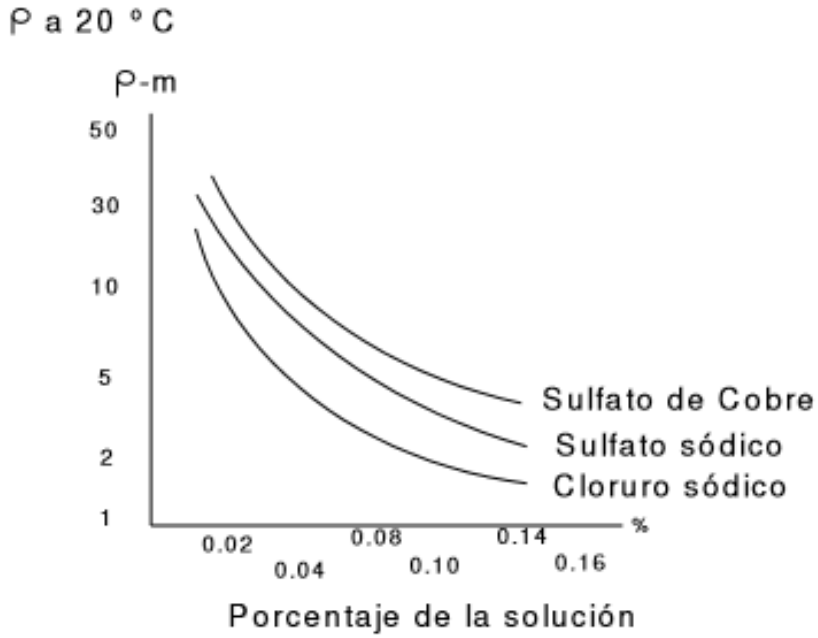
grafica 1 Resistividad del suelo en función de la temperatura.

- Las sales solubles y su concentración, como se muestra en la gráfica 2 (Al aumentar la salinidad del terreno, disminuye la resistividad).



grafica 2 Resistividad del suelo en función de la concentración de sales disueltas

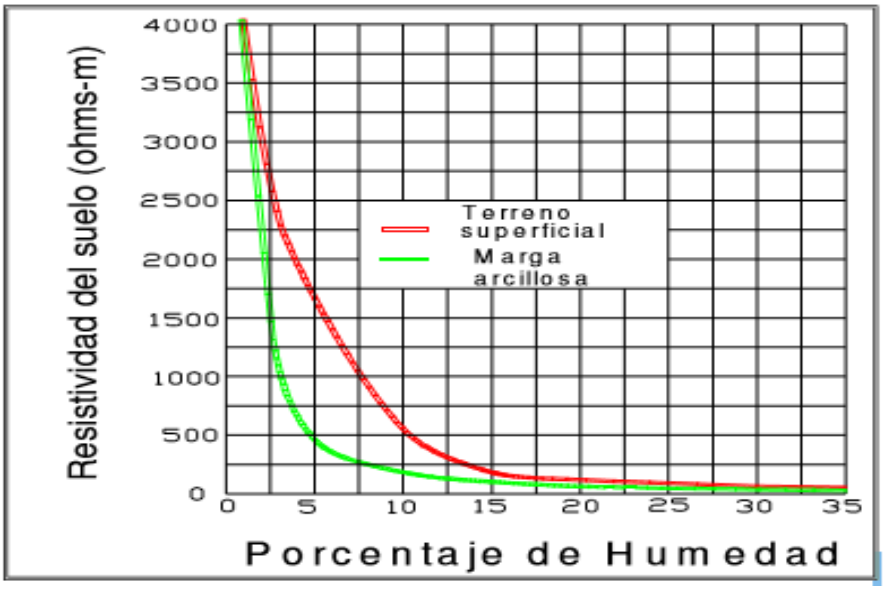
El contenido de sales produce una menor resistividad intergranular, lo cual permite circular corrientes con mayor facilidad y además, la sal (NaCl) es un material que absorbe con facilidad la humedad (higroscópico) al igual que el c



vegetal.

grafica 3 Resistividad del suelo en función del tipo de sales

- La humedad. En la gráfica 4 se puede observar que la resistividad aumenta conforme disminuye el contenido de agua en el terreno.



grafica 4 Resistividad del suelo en función de la humedad

- La estratificación del suelo (Cambios transversales y longitudinales de la resistividad en un mismo volumen de interés)

Debe agregarse que la composición de la tierra, incluso en un mismo sector o área, es muy heterogénea, ya que pueden presentarse diferentes capas, bolsas, depósitos, etc., tanto horizontal como verticalmente, como se muestra en la ilustración 2.6. Por lo tanto, la estratificación del suelo es la es la disposición en capas verticales y horizontales de las rocas sedimentarias.

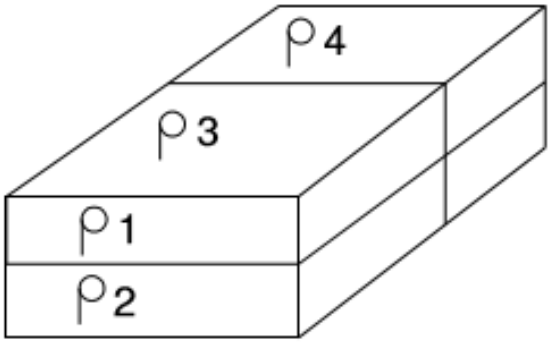


Ilustración 2 Estratificación del suelo

De esta manera, la resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes resistividades de las diversas capas que lo constituyen.

2.5 **MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO**

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo, puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas.

En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

El perfil de la resistividad del suelo determinará el valor de la resistencia a tierra y la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un terrómetro (llamado en otros países: telurómetro) o Megger de tierras de cuatro terminales.

Los aparatos de mayor uso, de acuerdo a su principio de operación, pueden ser de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Los terrómetro deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos eléctricos. Por ejemplo, si estamos cerca de una subestación o de una línea en servicio, y vamos a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas

van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.

También estos aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas.

Un aparato inteligente, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que halla, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce. Por ejemplo, para hacer una medición manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede seguir enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio.

Los terrómetros son analógicos o digitales y deben contener 4 carretes de cable calibre 14 AWG normalmente. Para enrollamiento rápido se recomienda construir un sistema devanador que permita reducir el tiempo de la medición. También traen 4 electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra con marro. Son de una longitud aproximada de 60 cm y un diámetro de 16 mm. Además de lo anterior se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 m aproximadamente.

Los terrómetro tienen cuatro terminales 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) y están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2. Los terrómetro deben estar certificados y probados en el campo con una resistencia antes de realizar las mediciones.

Como la medición obtenida por un terrómetro es puntual, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero, y, en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.

2.6 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

El objetivo fundamental de las mediciones es encontrar un modelo de suelo que ofrezca una buena aproximación del suelo real. La resistividad varía lateralmente y con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del terreno. Las condiciones climáticas influyen en la resistividad medida, razón por la cual, dichas mediciones deben realizarse, en lo posible, en época de verano prolongado para obtener la resistividad más alta y desfavorable.

Los modelos más comúnmente usados para la resistividad del suelo son:

- **Modelo de suelo uniforme**: Usado sólo cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que raramente ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto.

- **Modelo de suelo de dos capas**: Es una representación muy exacta de las condiciones reales del suelo, y consiste en una capa superior de profundidad finita y con resistividad diferente a la de la capa más baja de espesor infinito.

- **Modelo de suelo multicapa**: Usado cuando las condiciones del suelo son más complejas.

Modelo de suelo uniforme:

Cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se puede usar un valor promedio para la resistividad del suelo, como una primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del patio, así:

$$\rho_{a\,prom} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + ---- + \rho_{an}}{n}$$

Donde:

ρa1 + ρa2 + ρa3 + --- + ρan → Resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamientos siguiendo el método de Wenner.

n → Número total de medidas tomadas.

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente.

En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30%.

Modelo de suelo de dos capas:

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión K, definido como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Donde:

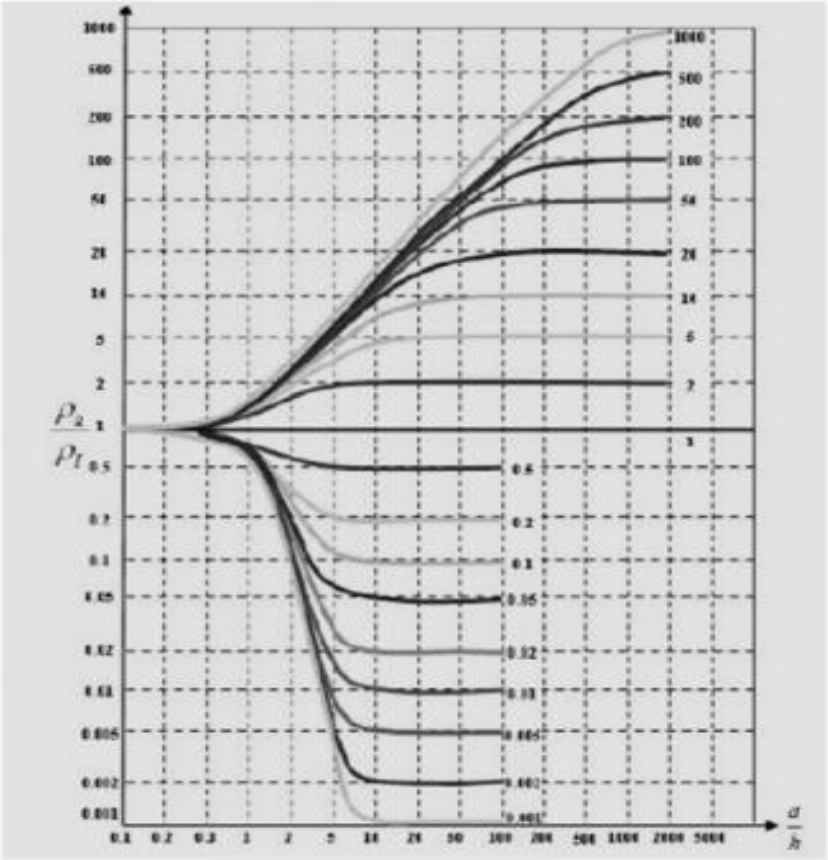
$\rho 1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en Ω-m.

$\rho 2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en Ω-m.

En muchos casos, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema seguro de puesta a tierra. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde. La gráfica siguiente está basada en los datos de prueba de Wenner.

Los parámetros $\rho 1$ y $\rho 2$ se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de Sunde, como sigue:

1. Dibujar el gráfico ρa vs. A
2. De la gráfica anterior se estiman $\rho 1$ y $\rho 2$, extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad, si los datos de campo son insuficientes.
3. Determinar $\rho 2 / \rho 1$ y seleccionar una curva del gráfico de la Figura 4, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
4. Seleccionar el valor de $\rho a / \rho 1$ sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva $\rho 2 / \rho 1$ apropiada.
5. Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X. f) Calcular ρa multiplicando el valor seleccionado $\rho a / \rho 1$ por $\rho 1$.
6. g) Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρa vs. a.
7. Calcular la profundidad del nivel superior H usando la separación de prueba apropiada a.


$\frac{\rho_2}{\rho_1}$
$\frac{d}{h}$

grafica 5 método grafico de sunde

Modelo de suelo multicapas:

Se pueden encontrar condiciones de suelo altamente no uniforme, que requieren el uso de técnicas de modelamiento multicapas, cuando un modelo de suelo de dos capas no es factible. Un modelo multicapa puede incluir varias capas horizontales o varias capas verticales. Las técnicas para interpretar resistividades de suelo altamente no uniforme requieren el uso del método de los elementos finitos, considerando las características anisotrópicas del tensor de conductividad, para la solución de la ecuación.

2.7 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores gruesamente aproximados de la resistividad. Por tanto, es necesario tomar mediciones directamente en el sitio donde quedará ubicada la puesta a tierra.

Las técnicas para medir la resistividad del suelo son esencialmente las mismas cualquiera sea el propósito de la medida. Sin embargo, la interpretación de los datos recolectados puede variar considerablemente y especialmente donde se encuentras suelo con resistividad no uniforme.

Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales superpuestas, cada una teniendo diferente resistividad. A menudo se presentan también cambios laterales de resistividad, pero más graduales a menos que se configuren fallas geológicas. Por tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas para determinar si hay alguna variación importante de la resistividad con la profundidad.

Las diferentes técnicas de medida son descritas en detalle en la IEEE Std 811983 “IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potencial of a ground system”.

2.7.1 Método de wenner

El método de los cuatro puntos de Wenner es el método más preciso y popular. Son razones para esto que: el método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades, no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas, los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno.

El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad "b" y espaciados (en línea recta) una distancia "a" como se ilustra en la ilustración 1.

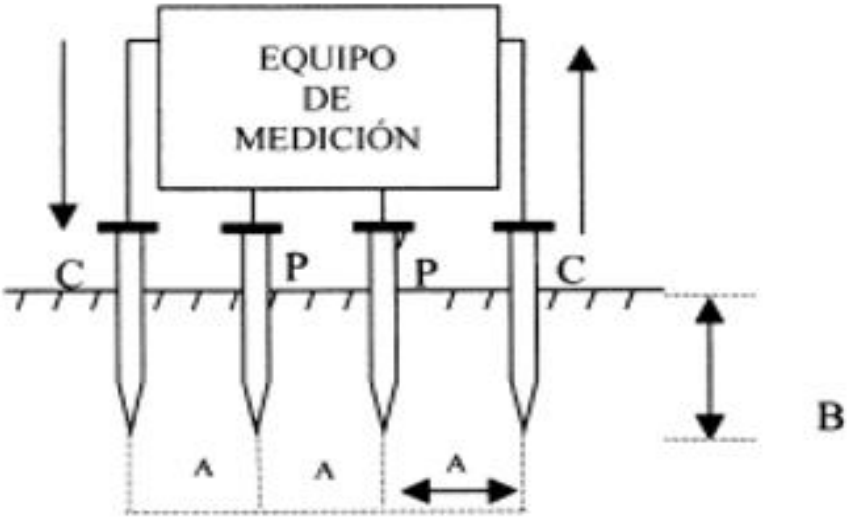


Ilustración 3 método de medición wenner

Una corriente "I" se inyecta entre los dos electrodos externos y el potencial "V" entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. El instrumento mide la resistencia R (=V/I) del volumen de suelo cilíndrico de radio "a" encerrado entre los electrodos internos. La resistividad aparente del suelo ρa, a la profundidad "a" es aproximada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)}$$

Dado que en la práctica la distancia "a" es mucho mayor que la profundidad de enterramiento "b", la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$\rho = 2\pi Ra$$

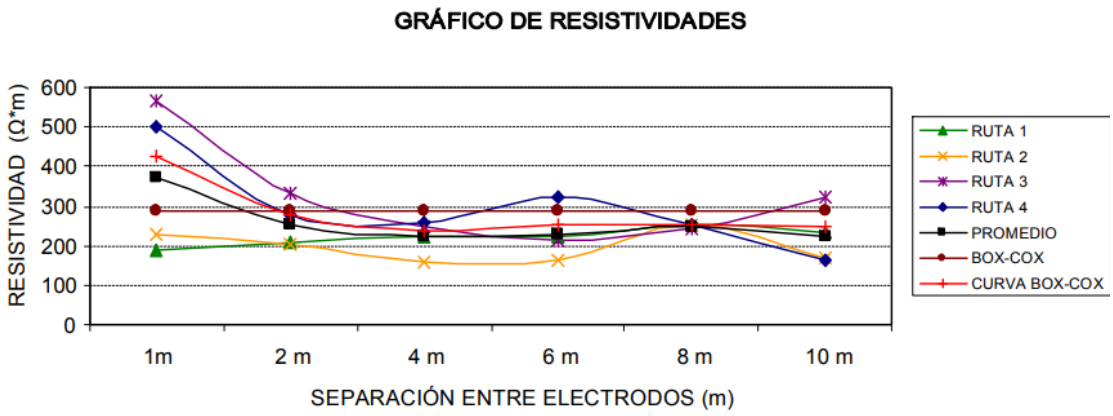
Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor que la máxima

dimensión esperada del sistema de puesta a tierra (por ejemplo, la mayor distancia posible entre 2 puntos de una malla, o la profundidad de las varillas).

El espaciamiento "a" del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del suelo. Para caracterizar la variación de la resistividad del suelo dentro de un área específica, se deben realizar varios grupos de medidas (perfiles) en diferentes direcciones.

Diferentes lecturas tomadas con varios espaciamientos alineados dan un grupo de resistividades (perfil), que cuando son graficadas contra el espaciamiento, indican si hay capas diferentes de suelo y dan una idea de su respectiva profundidad y resistividad.

que cuando son graficadas contra el espaciamiento, indican si hay capas diferentes de suelo y dan una idea de su respectiva profundidad y resistividad. La grafica 15 ilustra este concepto.



grafica 6 curva de resistividad típica

2.7.2 Método de SchlumbergerPalmer

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separacion entre electrodos es, aunque simetricamente, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tension y entre estos los de corriente.

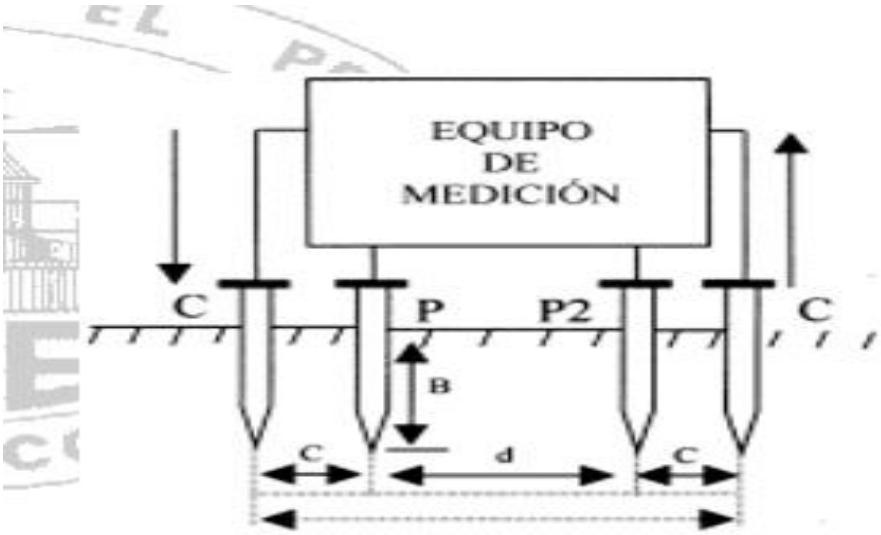


Ilustración 4 Método de SchlumbergerPalmer

El procedimiento para obtener el modelo del terreno, consiste en separar progresivamente los electrodos, alrededor de un punto central permanente, denominado punto de máxima exploración. La fórmula con la cual se calcula la resistividad aparente del terreno es:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d}$$

Donde:

- c: es la separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión.
- d: es la separación entre los electrodos de tensión.

Este método permite ahorrar bastante tiempo in situ, especialmente si se quiere realizar varias medidas de resistividad y por consiguiente crear un perfil del terreno. En efecto, sólo deben moverse los 2 electrodos exteriores a diferencia del método de Wenner que necesita desplazar los 4 electrodos a la vez.

2.7.3 Método de medición de resistencia de una varilla

También conocido en la norma ANSI/IEEE Std 811983 como el Método de la Variación de Profundidad (variation of depth method), consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y, basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo

y los datos geométricos de la varilla, derivar la resistividad del suelo. Se asume como en los métodos anteriores, que el terreno es homogéneo

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

Donde:

- p: Resistividad del terreno
- L: longitud del electrodo
- a: radio del electrodo
- R: valor de resistencia leído por el equipo

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de la variación de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra (lo que originó el nombre de Método de la Variación de Profundidad), es decir por cada marca se lee un valor de resistencia y con la fórmula anterior se calcula la resistividad.

Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o de Schlumberger-Palmer, pues la prospección es mucho menor, o en el caso de solo poder disponer de un telurómetro de tres electrodos.

2.8 TIPOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

De acuerdo a su aplicación los sistemas de puesta a tierra son:

- Puesta a tierra para sistemas eléctricos.
- Puesta a tierra de los equipos eléctricos.
- Puesta a tierra en señales electrónicas.
- Puesta a tierra de protección electrónica
- Puesta a tierra de protección atmosférica

2.8.1 Puesta a tierra para sistemas eléctricos

El propósito de aterrar los sistemas eléctricos es limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos. Esto se realiza mediante un

conductor apropiado a la corriente de falla a tierra total del sistema, como parte del sistema eléctrico conectado al planeta tierra.

2.8.2 Puesta a tierra de los equipos eléctricos

Su propósito es eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro la vida y las propiedades, de forma que operen las protecciones por sobre corriente de los equipos.

Utilizado para conectar a tierra todos los elementos de la instalación que en condiciones normales de operación no están sujetos a tensiones, pero que pueden tener diferencia de potencial con respecto a tierra a causa de fallas accidentales en los circuitos eléctricos, así como los puntos de la instalación eléctrica en los que es necesario establecer una conexión a tierra para dar mayor seguridad, mejor funcionamiento y regularidad en la operación y en fin, todos los elementos sujetos a corrientes eléctricas importantes de corto circuito y sobretensiones en condiciones de falla.

Generalmente la resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 Ohm. Para la conexión a tierra de los equipos, se instalan en los edificios, una barra de cobre electrolítico de dimensiones adecuadas, instaladas a unos 60 cm sobre el nivel de piso con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de fuerza en las concentraciones de tableros de cada piso.

2.8.3 Puesta a tierra en señales electrónicas

Para evitar la contaminación con señales en frecuencias diferentes a la deseada. Se logra mediante blindajes de todo tipo conectados a una referencia cero o a tierra.

2.8.4 Puesta a tierra de protección electrónica

Para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por sobre voltajes, se colocan dispositivos de protección de forma de limitar los picos de sobré tensión conectados entre los conductores activos y tierra.

La puesta a tierra de los equipos electrónicos y de control, consta de una serie de electrodos instalados remotamente al edificio. En el interior se instala una barra de cobre electrolítico de dimensiones adecuadas montada a 2.60 metros sobre nivel de piso terminado con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de electrónica.

La resistencia a tierra máxima en este sistema debe ser de unos 2 Ohm, cuando no se alcanza la resistencia deseada, se instala algún elemento químico para reducir la resistividad del terreno y alcanzar así, la resistencia a tierra requerida.

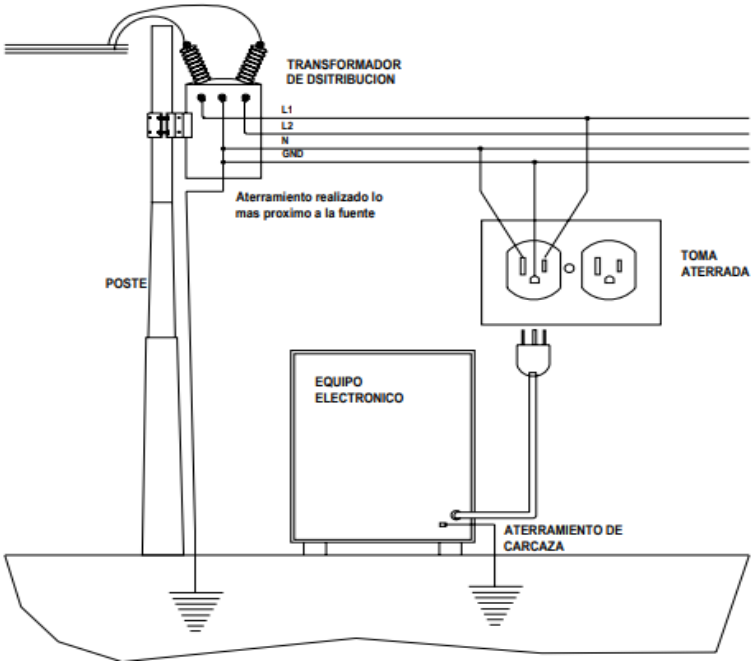


Ilustración 5 puesta a tierra de protección electrónica

2.8.5 Puesta a tierra de protección atmosférica

Como su nombre lo indica, se destina para drenar a tierra las corrientes producidas por descargas atmosféricas (RAYOS) sin mayores daños a personas y propiedades. Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger o se conforma con electrodos tipo copperweld y cable tipo pararrayos de cobre Clase 1 de 27 hilos.

La distancia del edificio con respecto al sitio donde se entierre el electrodo, no debe ser inferior a 2,50 metros y debe quedar totalmente aislado de los sistemas de tierras para fuerza y para electrónica.

La resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 ohm, para lo cual, en caso necesario, se implementarán arreglos de electrodos en Delta y/o un agregado de elementos químicos para reducir la resistividad del terreno, recomendados por el CEN en el artículo 250-83.

2.8.6 **Protección a tanques**

ciertos tanques están autoprotegidos contra rayos, como se menciona. Por ejemplo, un tanque que es eléctricamente continuo y de por lo menos 3/16" de grueso no puede ser dañado por las descargas directas. Pero, el tanque debe estar sellado contra es escape de vapores que puedan incendiarse.

Los tanques se conectan a tierra para alejar la energía de una descarga directa así como para evitar las cargas electroestáticas. Tanques mayores de 6 metros de diámetro en concreto, asfalto o en tierra están sin duda conectados a tierra. Tanques menores a esa medida, necesita un medio adicional para conectarlos a tierra. Esto puede lograse de tres maneras. La más simple es conectarlo a sistemas de tubería que no tengan uniones aisladas. El segundo método consiste en conectar un mínimo de dos electrodos espaciados no más de 30 metros entre ellos radialmente al tanque. Y, por último el método más novedoso es el de emplear el acero de refuerzo del muro de contención de derrames.

2.9 **TENSIÓN DE PASO**

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$Ep = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Dónde:

- Ep: Tensión de Paso Permisible en voltios.
- Ps: Resistividad de la superficie del terreno en (Ω-m).
- t = Duración máxima de falla en segundos.

Según las normativas de la IEEE 81, “la Tensión de Paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo”.

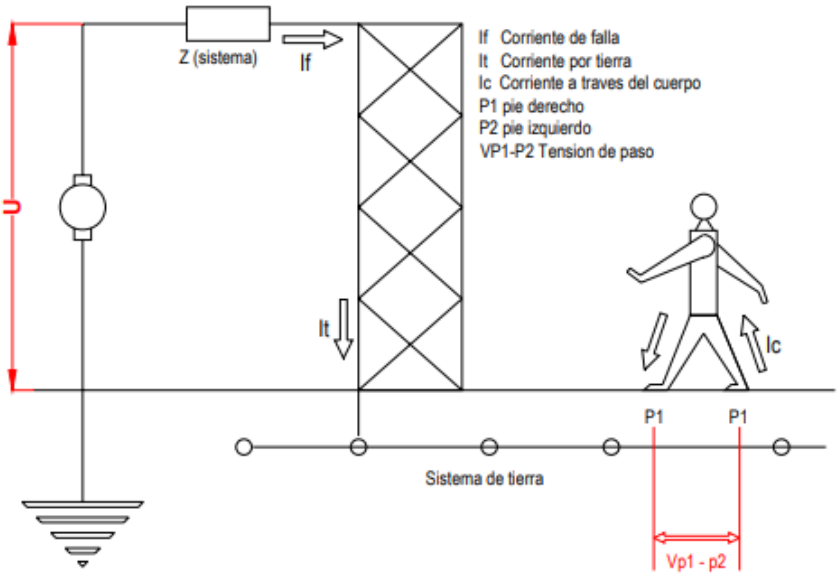
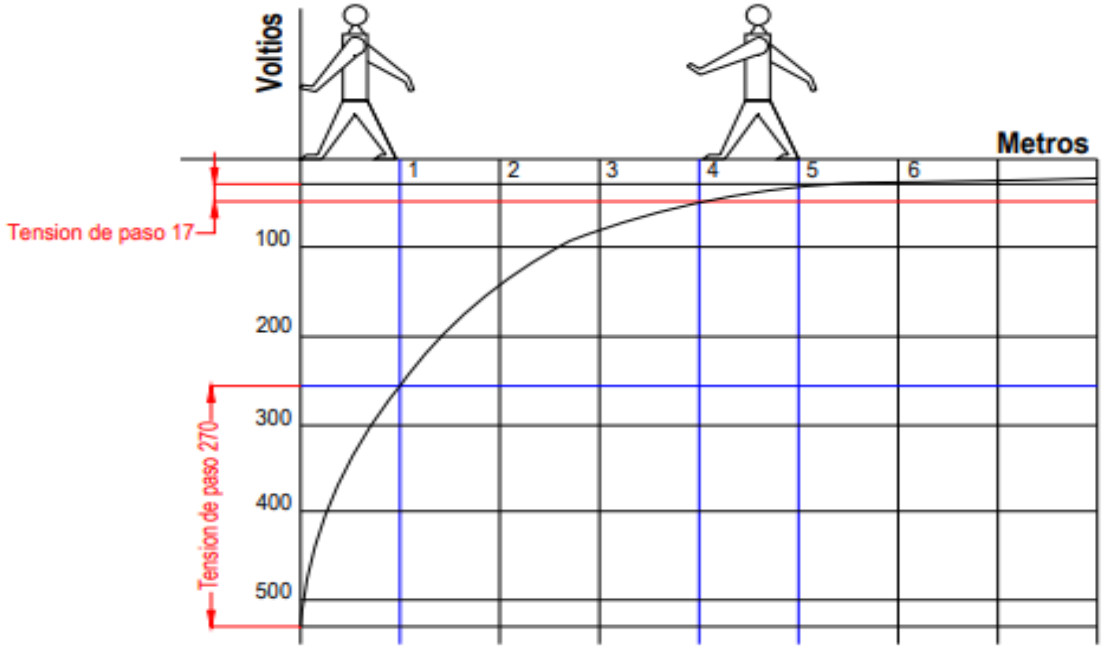


Ilustración 6 tensión de paso

Cabe recordar que bajo circunstancias de falla, la circulación de una corriente (I), por una toma de tierra, sitúa a ésta a una tensión (Uo), denominada de “puesta a tierra”, en relación con un punto lejano, de potencial cero, definiendo el cociente (Uo/I) la resistencia (R), de la toma de tierra, que tal como se verá más adelante, interviene como elemento de cálculo de la corriente que circula (de la cual depende el comportamiento de las protecciones) y de la propia tensión (Uo).

El gradiente de potencial en una región coincide, prácticamente, con el valor más elevado que puede alcanzar una “tensión de paso”, que adquiere evidentemente, sus valores más elevados, en las proximidades inmediatas de los electrodos de tierra. La tensión de paso (Up) es una fracción de la tensión de puesta a tierra (Uo)

Deberá considerarse que, cuando las dimensiones de la toma de tierra son pequeñas, respecto a su distancia (x), del lugar considerado, el gradiente de tensión en ese lugar no depende más que de (x) y de (I).



grafica 7 tensión de paso

En terreno Homogéneo, de resistividad (ρ) tiene por expresión:

$$Gx = 0.16\ \rho.I\ /\ X^2\ \ (V/m)$$

2.10 Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que se pueda ser tocado simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$Et = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

- Et: Tensión de contacto permisible en voltios.
- Ps: Resistividad de la superficie del terreno en (Ω-m).
- t: Duración máxima de falla en segundos.

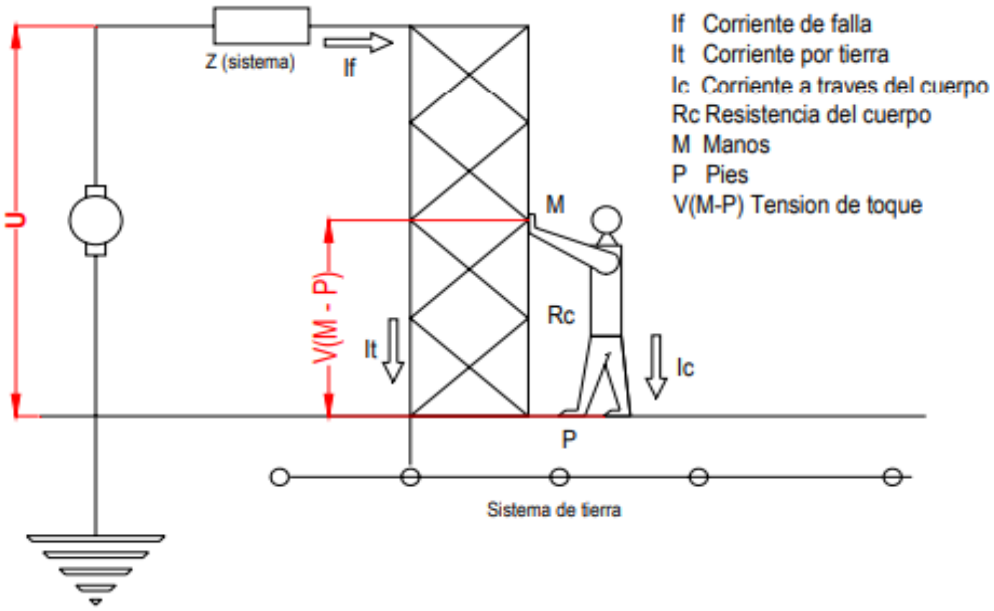


Ilustración 7 tensión de contacto

La normativa IEEE 81: define la tensión de contacto o de toque como sigue; "La tensión de contacto es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia horizontal máxima que pueda alcanzar una persona, o sea, aproximadamente, 1 metro".

$$Ux = 0{,}16\ \rho\ I/X$$

2.11 Tensiones Reales de Paso y de contacto

La tensión de paso real en una subestación está dada por:

$$E_p = k_s k_i \frac{\rho I}{L}$$

En donde:

E_p Tensión de paso real en voltios.

K_s: Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia combinada de la profundidad y del espaciamiento de la malla.

K_i: Coeficiente de irregularidad del terreno.

P: Resistividad del suelo (Ω-m).

I: Corriente máxima de falla (Ampere).

L: Longitud total del conductor (m).

La tensión de contacto real está dada por:

$$E_t = k_m k_i \frac{\rho I}{L}$$

Dónde:

E_t: Tensión de contacto en voltios.

k_m: Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.

2.12 Efectos fisiológicos del pasaje de la corriente por el cuerpo Humano

Umbral de sensibilidad.

El establecimiento de los límites a partir de los cuales la corriente eléctrica resulta peligrosa presenta notables dificultades. Puede dar idea de ello las dispersiones que aparecen en la determinación del umbral de sensibilidad sobre el paso de la corriente eléctrica, definido como el valor de la intensidad mínima que percibe una persona al hacer circular una corriente de mano a mano. Mientras que algunos detectan la corriente con intensidad de 0,5 mA, otros no empiezan a percibir su paso hasta que ésta no alcanza valores cercanos a los 2 mA

Umbral de no soltar

Este fenómeno tiene lugar por la excitación de nervios y músculos flexores bajo la acción de la corriente eléctrica, de forma que, al quedar contraídos, inhabilitan al individuo a dejar el conductor, toda vez que los extensores son menos potentes que los flexores. Por estudios realizados se ha comprobado que el sexo es una variable influyente.

Muerte aparente

Cuando el nivel de intensidad se eleva por encima del umbral de no soltar, se afectan grandes funciones fisiológicas, como la respiración y la circulación. En efecto para una intensidad del orden de 20 a 30 mA, la contracción muscular puede difundirse y alcanzar los músculos respiratorios (intercostales, pectorales y diafragma), originando una parada circulatoria (central o periférica), que ocasiona una asfixia con cianosis, para desembocar prontamente, en un estado de muerte aparente y en una parada circulatoria. Si el accidentado se sustrae rápidamente de la corriente y se le proporciona una asistencia respiratoria (antes que sobrevenga la parada cardiaca y, en consecuencia, las lesiones anóxicas del encéfalo) estos fenómenos son reversibles.

Fibrilación ventricular y su umbral

Desgraciadamente, no sucede lo mismo cuando el estado de muerte aparente se debe a una fibrilación ventricular. Esta situación está caracterizada por una contracción anárquica y asincrónica de cada una de las fibras del miocárdico, lo que se traduce, velozmente, en una parada circulatoria, y una anoxia que alcanza primero al cerebro, y después al mismo corazón.

Existe una proporcionalidad (según estudios estadísticos realizados por Dalziel) entre el peso corporal, y la intensidad necesaria para la fibrilación situándose este umbral de 70 a 100 mA.

Este umbral, es variable con las condiciones del sujeto, con los parámetros del accidente (tensión y tipo de contacto), pero fundamentalmente con:

- Trayectoria seguida de la corriente.
- El valor de la resistencia del organismo.

- El tiempo de paso, y la amplitud de la corriente.
- Otro parámetro influyente a considerar, es la frecuencia de la corriente, los umbrales son netamente más elevados cuando se trata de corriente continúa. Entre 10 y 1000 Hz, los umbrales son poco modificables, pero se elevan rápidamente cuando la frecuencia aumenta.

2.13 VALORES RECOMENDADOS POR NORMAS

Valores recomendados en código eléctrico nacional

El Código Eléctrico Nacional, Sección 250-84 establece que a un solo electrodo con resistencia a tierra mayor que 25 ohms debe aumentarse un electrodo adicional.

Es recomendable que las tierras con un solo electrodo se prueben al momento de su instalación y en forma periódica posteriormente.

La recomendación anterior es en letras resaltadas debido a su importancia. La resistencia a tierra puede variar con los cambios en el clima y la temperatura. Tales cambios pueden ser considerables. Un electrodo de tierra que fue bueno o de baja resistencia cuando se instaló, puede dejar de serlo; para asegurarse, debe ser revisado periódicamente.

No podemos decirle cual debe ser el valor máximo de la resistencia a tierra. Para sistemas específicos, en lugares definidos, las especificaciones se ajustan frecuentemente. Algunos requieren 5 ohm como máximo; otros no aceptan más de 3 ohm. En algunos casos, se requieren resistencias tan bajas como una fracción de ohm.

Valores recomendados por la IEEE 142-1991

La normativa IEEE 142 de 1991 establece lo siguiente:

- Para grandes subestaciones, estaciones de generación y líneas de transmisión, el valor debe ser de 1 ohm.
- Para subestaciones de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales, el valor debe estar entre 1 y 5 ohm.
- Para un electrodo simple, el valor debe ser 25 ohm.

2.14 CONFIGURACIONES TÍPICAS DE TIERRA

Las configuraciones típicas del sistema de tierra son las más utilizadas; para efectos de estudio se menciona a continuación su descripción y uso. Configuración Radial o Estrella.

- **El sistema radial**:

Consiste en uno o varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones a cada aparato, es el más barato pero el menos satisfactorio ya que al producirse una falla en un aparato, se producen grandes gradientes de potencial.

- **Sistema de anillo:**

  Consiste en instalar un cable de suficiente calibre (aproximadamente 100MCM) alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación, conectando derivaciones a cada aparato mediante un cable más delgado (500MCM O 4/0 AWG). Es un sistema menos económico que el anterior, los potenciales peligrosos disminuyen al dispararse la corriente de falla por varios caminos, lo que origina gradientes de potencial menor. Se utiliza para corrientes de corto circuito intermedias.

- **Sistema de Malla:**

  Es el sistema más utilizado en los sistemas eléctricos y consiste, como su nombre lo indica, en una retícula formada por cables de cobre (aproximadamente 4/0 AWG), conectada a través de electrodos de varillas copperweld a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficaz, pero también el más caro de los tres.

2.15 VENTAJAS DEL USO DE SISTEMAS COMBINADOS DE VARILLAS HORIZONTALES Y CONDUCTORES VERTICALES

Otra de las consideraciones es el uso de un sistema combinado de varillas verticales y conductores horizontales, el cual tiene las siguientes ventajas:

- Con los conductores horizontales (malla) se reduce el peligro de los altos voltajes de paso y de contacto en la superficie de tierra, las varillas de tierra estabilizan el diseño de tal sistema combinado, ya que con la lluvia la resistividad de la capa superior del suelo puede variar mientras que la resistividad de las capas profundas del suelo permanece constante.
- Las varillas que penetran las capas del suelo más bajas son más efectivas para disipar la corriente de falla, cada vez que un suelo de dos capas es encontrado y la capa superior del suelo tiene resistividad más alta que la inferior.
- Las varillas moderarán considerablemente el incremento de los gradientes de paso en la superficie cerca del perímetro de la malla.

2.16 FUNCIONES DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA

Entre las más importantes se tienen:

- Evitan sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas, operación o maniobras de disyuntores.
- Proporcionar una vía rápida de descarga de baja impedancia con el fin de mejorar y asegurar el funcionamiento de protecciones.
- Proporcionar seguridad al personal de la subestación.

2.17 GEOMETRÍA DE LA MALLA

Las limitaciones de los parámetros físicos de una malla de puesta a tierra están basadas en las restricciones físicas y económicas de la misma. Es poco práctico instalar una placa de cobre como sistema de puesta a tierra.

- Los espaciamientos típicos entre conductores (D) están en el rango:
  $15m > D > 3m$

- Las profundidades típicas (h) están en el rango:
  $1.5m > h \geq 0.5$ m

- Los calibres típicos de conductores (ACM) están en el rango:
  500 MCM > ACM$\geq$ 2/0 AWG

- El diámetro del conductor de la malla tiene un efecto despreciable sobre la tensión de malla.

- El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia de malla (Rg). Entre mayor sea A, menor será Rg y por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR).

2.18 REQUISITOS DE UNA MALLA A TIERRA

Los requisitos que debe cumplir una malla de puesta a tierra son los siguientes:

- Debe tener una resistencia tal, que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra.
- La variación de la resistencia, debido a cambios ambientales, debe ser despreciable de manera que la corriente de falla a tierra, en cualquier momento, sea capaz de producir el disparo de las protecciones.
- Impedancia de onda de valor bajo para fácil paso de las descargas atmosféricas.

- Debe conducir las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre sus puntos vecinos.
- Al pasar la corriente de falla durante el tiempo máximo establecido de falla, (es decir disparo de respaldo), no debe haber calentamientos excesivos.
- Debe ser resistente a la corrosión.

2.19 CONFIGURACIÓN EN MALLA O RED

El sistema de red es el de más uso actualmente en el sistema eléctrico y consiste en una malla formada por cable de cobre (aproximadamente de 4/0 AWG) conectado a través de electrodos de varilla de copperweld a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficiente, pero el más costoso de los tres tipos. Estas varillas copperweld son generalmente las más utilizadas por sus ventajas como son: buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica y la combinación de la baja resistencia del cobre y la rigidez del fierro. Configuración en malla o red.

2.20 CÁLCULO DE CONDUCTOR PARA UNA MALLA

La elevación de temperatura de corto tiempo en un conductor de tierra, o el tamaño requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor, se encuentra mediante la ecuación:

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_C.\alpha_r.\rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde:

- IF → Corriente asimétrica de falla RMS en KA, se usa la más elevada encontrada. AMCM → Área del conductor en MCM.
- Tm → Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión en °C.
- Ta → Temperatura ambiente en °C.
- Tr → Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.
- α0 → Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C.
- αr → Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia Tr 1/°C.

- ρr → Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia Tr μΩ-cm.
- Ko → 1/α0 o [(1/α0) – Tr] en °C.
- TC → Duración de la corriente en segundos.
- TCAP → Capacidad térmica por unidad de volumen en J / (cm3 *°C).

La Tabla 1 proporciona los datos para las constantes αr, Ko , Tm , ρr , y TCAP.

La fórmula simplificada da una aproximación muy buena:

$$A_{MCM} = I_F * K_f * \sqrt{t_C}$$

Donde:

- KF → Constante para el material dado en la Tabla 3, usando una Ta = 40 °C.

El tamaño del conductor realmente seleccionado es usualmente más grande que el que se basa en la fusión, debido a factores como:

- El conductor debe resistir los esfuerzos mecánicos esperados y la corrosión durante la vida útil de la instalación.
- El conductor debe tener alta conductancia para prevenir caídas de tensión peligrosas durante una falla.
- La necesidad de limitar la temperatura del conductor.
- Debe aplicarse un factor de seguridad a la instalación de puesta a tierra y a los demás componentes eléctricos.

Se acostumbra entonces emplear como calibre mínimo el N° 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión. La Tabla 2 muestra las dimensiones típicas de los conductores empleados para el sistema de puesta a tierra.

DESCRIPTION	Material conductivity (%)	αr factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (0°C)	Fusing temperature Tm	ρr 20°C ($\mu\Omega$.cm)	TCAP thermal capacity [J/(cm^3.°C)	Kf
Copper, annealed soft-drawn	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42	7
Copper, commercial hard-drawn	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42	7,06
Cooper-clad steel wire	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85	10,45
Cooper-clad steel wire	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85	12,06
Cooper-clad steel rod	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85	14,64
Aluminum, EC grade	61	0,00403	228	657	2,86	2,56	12,12
Aluminum, 5005 alloy	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6	12,41
Aluminum, 6201 alloy	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6	12,47
Aluminum-clad steel wire	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58	17,2
Steel,1020	10,8	0,00316	605	1510	15,9	3,28	15,95
Stainless-clad steel rod	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44	14,72
Zinc-coated steel rod	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93	28,96
Stainless steel, 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03	30,05

Tabla 1 Constantes de los materiales conductores dado por la IEEE-80.

CALIBRE DEL CONDUCTOR		AREA NOMINAL	DIAMETRO
MCM	AWG	mm^2	m
350		177,35	0,015
300		152,01	0,0139
250		126,68	0,0127
211,6	4/0	107,22	0,0117
167,8	3/0	85,03	0,0104
133,1	2/0	67,44	0,0093

Tabla 2 Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra IEE-80

2.21 Valor de la resistencia de Puestas a Tierra

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra se puede hacer por el método de Laurent y Niemann o por método de Dwight.

2.21.1 **Método de Laurent y Niemann**

Este método es bastante aproximado y la expresión para el cálculo es:

$$R = 0.443\rho\left(\frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L}\right)$$

Donde:
R: Resistencia en ohmios.
A_{γ}: Área de la malla de puesta a tierra en m²
P: Resistividad del suelo (Ω-m)
L: Longitud total del conductor (m).

La ecuación anterior es una aproximación y su resultado siempre es mayor que el valor real.

2.21.2 **Método de Dwight**

Este método es mucho más largo, pero es mucho más exacto que el anterior.
El primer paso consiste en hallar la resistencia de un conductor de la malla.

$$Rs = \frac{\rho}{2\pi L'}\left(\ln\left(\frac{2L'}{r}\right) + \ln\left(\frac{L'}{h}\right) + \frac{2h}{L'} - \frac{h^2}{(L')^2} - 2\right)$$

Donde:

R_s = Resistencia de puesta a tierra de un solo conductor en Ω
ρ = Resistividad en (Ω-m)
L′ = Longitud del conductor (m) h = Profundidad de enterramiento del conductor (m)
r = Radio del conductor en m.

Una vez calculada esta resistencia, se procede al cálculo de las resistencias debidas a las interferencias mutuas entre los conductores, tal resistencia es:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L'}\left(\ln\left(\frac{4L'}{E}\right) + \ln\left(\frac{E}{2L}\right)\frac{E^2}{16(L')^2} - 1\right)$$

Donde:

R_a = Resistencia mutua en Ω
E = Espaciamiento equivalente entre un conductor y los demás en m.

La resistencia total de un conductor es:

$$R_c = R_s + (n-1)R_a$$

La resistencia de n conductores es:

$$R_{cn} = \frac{R_c}{n}$$

También en forma análoga se determina la resistencia de los conductores transversales de unión.

La resistencia "mutua" de los componentes de unión incluyendo la interferencia debida a los conductores transversales a los cuales se encuentran unidos es:

$$R_{am} = (m-1)R_{au} + (n-1)R_a$$

R_{au} = Resistencia mutua de conductores de unión (Ω).

La resistencia total de un solo conductor de unión es:

$$R_{cu} = R_{su} + R_{am}$$

R_{su} = Resistencia de un solo conductor de unión (Ω).

La resistencia de los m conductores es:

$$R_{cm} = \frac{R_{cu}}{m}$$

La resistencia total de la malla está dada por:

$$R = \frac{R_{cn} * R_{cm}}{R_{cn} + R_{cm}}$$

2.22 Diseño de una malla

La Norma Oficial Mexicana de instalaciones eléctricas requiere de un sistema enmallado de tierra con múltiples electrodos y conductores enterrados, cuando están involucradas tensiones y corrientes eléctricas muy altas, con el fin de minimizar los riesgos al personal en función de la tensión eléctrica de paso y de contacto.

La malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0,30 a 1,0 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando retículas cuadradas.

El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo, de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo eléctrico de la subestación o planta generadora. Con ello, se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas.

En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente con soldadura exotérmica entre sí y en los puntos donde se conectan los equipos que pudieran presentar falla o, en las esquinas de la malla, los conductores deben conectarse a electrodos de varilla o tubo de 2,4 m de longitud mínima, clavados verticalmente.

Los cables que forman la malla deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipo para facilitar la conexión a los mismos, ya que es una práctica común de ingeniería aterrizar a dos cables diferentes todos los equipos.

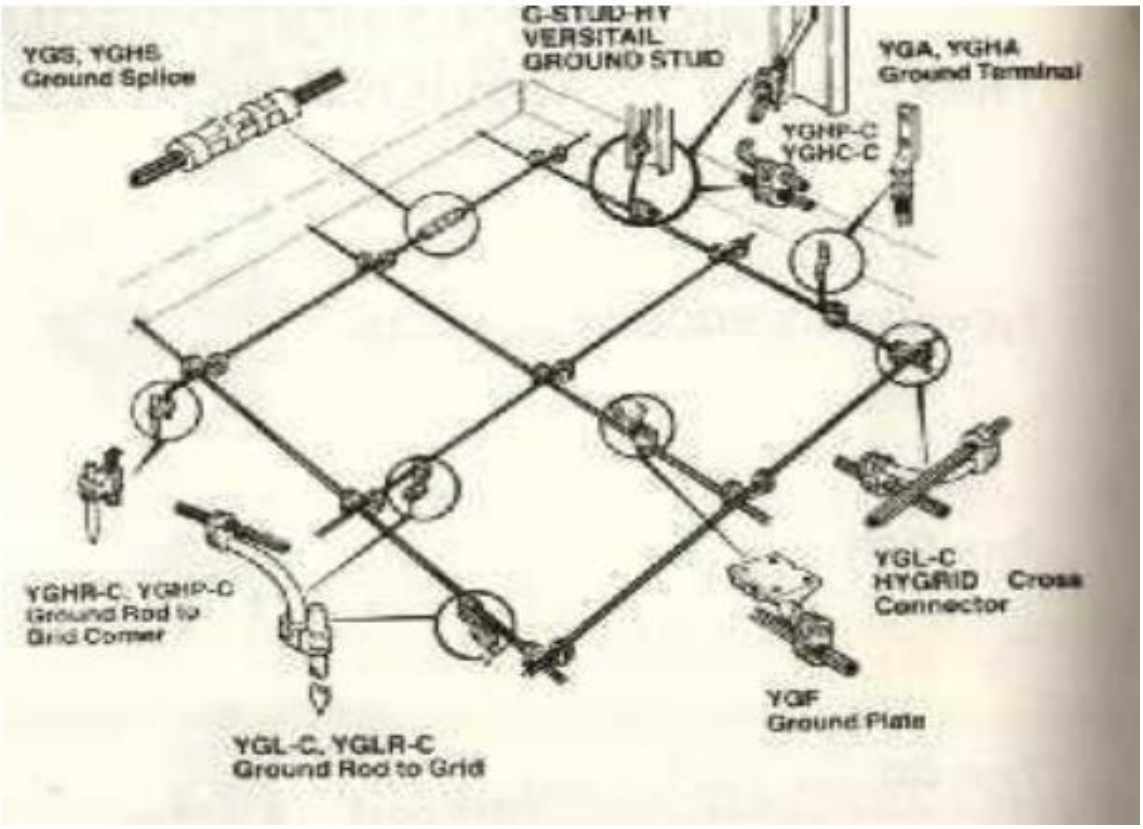


Ilustración 8 diseño de una malla

Los cables empleados en las mallas de tierra son de: acero, acero inoxidable, acero galvanizado, y cobre. Para evitar la corrosión galvánica en terrenos de baja resistividad, algunas compañías eléctricas desde el diseño utilizan en sus mallas de tierras, cable de cobre estañado para bajar el potencial electronegativo entre los diferentes metales. El factor principal en la selección del material es la resistencia a la corrosión. El cobre es el material más utilizado porque es económico, tiene buena conductividad, es resistente a la corrosión y tiene un punto elevado de fusión.

2.23 NATURALEZA DE UN ELECTRODO A TIERRA

La resistencia a la corriente a través de un electrodo de puesta tierra realmente tiene tres componentes como se puede observar en la Figura a continuación.

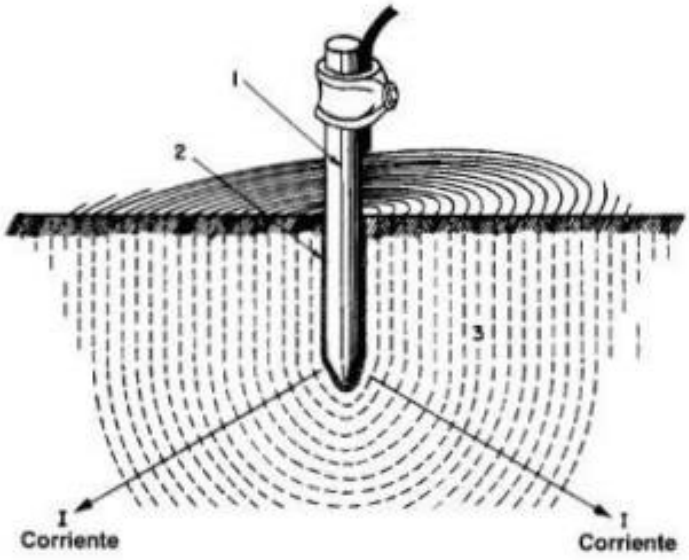


Ilustración 9 naturaleza de un electrodo de tierra

Componentes de la resistencia de tierra en un electrodo de tierra

- Resistencia del electrodo por sí mismo y las conexiones a él.
- Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo colindante a él.
- Resistencia de la tierra circundante.

2.24 ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE TIERRA

En un sistema de tierras los elementos que lo conforman son de vital importancia ya que de éstos depende el buen funcionamiento; a continuación, se describe cada uno:

2.24.1 Electrodos de Puesta a Tierra

Es muy importante tomar en cuenta que los electrodos de puesta a tierra de los sistemas eléctricos deben de ser accesibles y preferiblemente estar en la misma zona del puente de unión principal del sistema. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEDE-2012), el sistema de electrodos de puesta a tierra

se forma interconectando los siguientes tipos de electrodos (siempre que existan): ELECTRODO EMPOTRADO EN CONCRETO Este dispositivo es utilizado; en estructuras nuevas, se toma el acero del concreto armado como electrodo principal, siempre y cuando la cimentación haya sido diseñada para este fin con los cables de tierra adecuados soldados a las varillas.
Según La Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEDE-2012) debe constar de por lo menos 6 metros de una o más varillas de acero desnudo o galvanizado o revestido de cualquier otro recubrimiento eléctricamente conductor, de no menos de 13mm de diámetro localizado en y cerca del fondo de un cimiento o zapata, empotrado al menos 50mm en el concreto.

2.24.2 **ANILLO DE TIERRA**

Un anillo de tierra es un electrodo constituido por un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG (por resistencia mecánica) y de longitud no menor a 6m enterrado a una profundidad de 800 mm y, que rodee al edificio o estructura. Estos anillos de tierras se emplean frecuentemente circundando una fábrica o un sitio de comunicaciones, para proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos.

2.24.3 **ELECTRODOS DE VARILLA O TUBERÍA**

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEDE-2012) los electrodos de varilla y tubo, no deben tener menos de 2,40 m de largo y deben instalarse de tal modo que por lo menos 2,40 m de su longitud esté en contacto con la tierra.

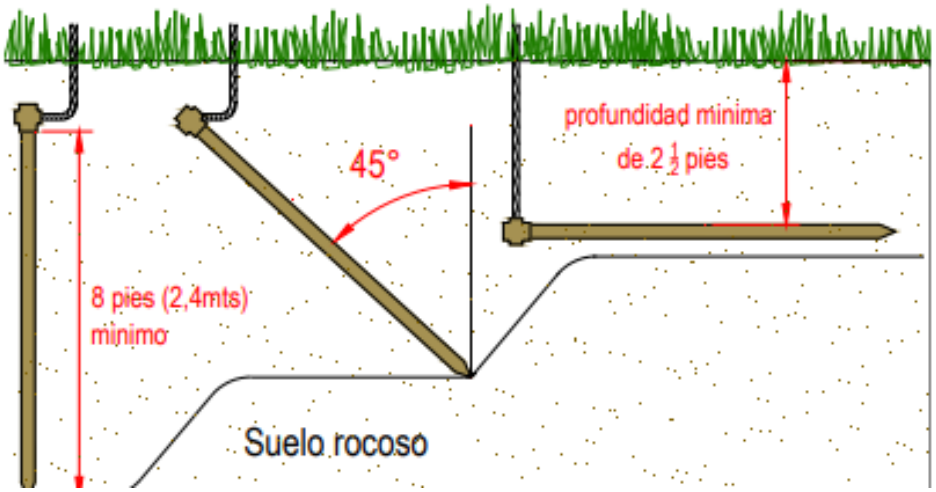
Las varillas de metales no ferrosos deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm de diámetro, y las demás de por lo menos 16 mm. Las tuberías deben tener un diámetro no inferior a 19 mm, y si son de hierro, deben tener una protección contra corrosión en su superficie.

Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre de 10 milésimas dura un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas dura hasta 45 años. En cambio, una varilla de acero galvanizado tiene una vida estimada de 15 años. Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos o de tepetate, las varillas no pueden meterse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar.
Cuando la roca está a menos de 2,40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical. Pero, si no es este el

caso, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para el caso a 800 mm de profundidad por lo menos.

La alternativa al golpeado es perforar un agujero, instalar la varilla y rellenar nuevamente el agujero, aunque no se obtiene la compactación ni la baja resistencia de contacto de la varilla percutida.

Ilustración 10 electrodo de varilla o tubería



a resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula de Dwight del M.I.T.

$$R= p/(2 * pi * L) * [Ln (4L / a) - 1]$$

Dónde:

- p es la resistividad del terreno en ohm - m
- L es el largo de la varilla en m
- a es el diámetro de la varilla en m

La fórmula de Dwight para el caso de varilla enterrada en doble capa de tierra:

$$R= p0/(2*pi*L)*(Ln\ a1 - Ln\ a0) + p1/(2 * pi * L)* [Ln(4L) - 1 - Ln\ a1]$$

Dónde:

- p0 es la resistividad del terreno adjunto en ohm – m
- p1 es la resistividad del terreno circundante en ohm - m
- L es el largo de la varilla en m a0 es el diámetro de la varilla en m
- a0 es el diámetro de la varilla en cm
- a1 es el diámetro del terreno adjunto a la varilla en m

2.24.4 ELECTRODOS DE PLACA

Los electrodos de placa no deben de tener menos de 0,2 metros cuadrados de superficie en contacto con el suelo. Y las placas de acero o fierro deberán tener por lo menos 6,4 mm de espesor. Si son de material no ferroso debe tener por lo menos 1,52 mm de espesor. Los tipos de electrodos no permitidos por la Norma Oficial Mexicana son: Tuberías de gas enterradas. Electrodos de aluminio.

2.24.5 ESTRUCTURAS METÁLICAS ENTERRADAS

El CEN menciona la puesta a tierra mediante sistemas de tuberías o tanques enterrados. Pero, puede ser cualquier clase de estructura metálica subterránea.

2.24.6 ELECTRODOS PARA PUESTA A TIERRA EN RADIO FRECUENCIA

Para torres de radiodifusión, se emplean cables en configuración estrella (radiales) para su puesta a tierra. Se ha encontrado más efectivo tener conectados los cables en un punto que tener múltiples anillos rodeando el sitio. Esos cables radiales pueden ser menores a 30 m de largo si el suelo es adecuado. Los cables dispersan la energía de las descargas muy eficientemente. Como la corriente se divide en proporciones iguales en los cables radiales, entre más cables, menor corriente los circula. Una baja corriente es más fácil de disipar y tendrá menor impacto en la elevación del potencial de tierra del sistema.

2.24.7 BARRA DE EQUIPOTENCIAL

La barra equipotencial es el área donde terminan todas las conexiones a tierra provenientes de los equipos, guías, etc. Físicamente es una barra de cobre con huecos que permiten soportar conexiones del tipo doble ojo.

Ilustración 11 barra de equipotencial

En exteriores, es necesaria una barra equipotencial colocada en el punto donde las guías entren al shelter, edificio, área, etc. Esta barra debe ubicarse lo más cerca posible a la ventana de acceso de manera que permita la conexión de las líneas de transmisión que se encuentren en la parte superior de la misma. Esta barra estará conectada a un punto de tierra del anillo exterior con un conductor # 2 AWG o mayor de cobre que posea una chaqueta de color verde, además de ir por una tubería PVC, con pintura de revestimiento color verde.
Cada conexión a la barra de tierra debe estar cubierta en los puntos de contacto con grasa antioxidante y no se debe colocar más de un conector en cada hueco de la barra. En caso de que no exista espacio disponible en la existente, se debe colocar otra barra la cual debe estar eléctricamente conectada al anillo exterior y a la barra principal mediante un conductor de cobre calibre # 2 AWG o mayor.

Esta barra debe estar aislada mediante accesorios que no permitan que exista continuidad eléctrica entre ella y su soporte. El largo de la barra varía en función del número de conexiones que se estiman realizar y posibles expansiones, por lo general, las barras instaladas en exteriores tienen una longitud de 20 lo que permite un total de 14 conexiones (doble ojo); este tamaño puede variar dependiendo del tamaño del shelter y la cantidad de equipos que van a alojar.
Las barras expuestas a la intemperie, al igual que las conexiones a las mismas, deben ser protegidas contra la corrosión cubriéndolas con grasa, evitando así que los agentes corrosivos la afecten.
Las barras en exteriores deben estar ubicadas en función a los siguientes criterios:

- En caso de utilizar monopolios (bases tubulares) siempre debe existir una barra de tierra ubicada en la parte inferior del mismo.
- En caso de utilizar torres, deben existir barras de tierra ubicadas según:
    - Siempre debe existir una barra de tierra en la parte superior de la torre a 3 m del tope.
    - Siempre debe existir una barra de tierra al final del recorrido vertical ubicada a 1 metro de la transición del recorrido horizontal.

- Para torres comprendidas entre los 40 y 90 metros debe existir una barra de tierra adicional ubicada en el medio del recorrido vertical
- Para torres mayores a 90 metros deben existir 2 barras de tierra adicionales ubicadas de manera tal que exista una separación equidistante entre las 4 barras existentes.
- Siempre debe existir una barra de tierra ubicada en la ventana de acceso de la caseta.
- Cuando existan recorridos horizontales mayores a 45 m deben existir barras de tierra adicionales ubicadas aproximadamente cada 25 m.

2.25 ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

Cuando se tienen disponible un sistema metálico subterráneo de agua. Se recomienda utilizarlo perfectamente sobre cualquier otro sistema, como electrodo de tierra, siempre que tenga enterrada una longitud mínima de 15 m. En casos de no existir un sistema de distribución de agua podrá adoptarse cualquiera de las soluciones siguientes:

Electrodos de canastillos

Formados por un enrollado de alambre de cobre sección mínima número 8 AWG (8,37 mm2). Con una superficie equivalente a la de los electrodos de placa.

Electrodos de barras

Formados por tuberías de acero galvanizados de una pulgada de diámetro y un largo mínimo de 2.5 m; o tuberías de cobre 5/8 e igual largo. Los electrodos deben instalarse enterrados a una profundidad en que se asegura un nivel de humedad permanente. Al enterrarlos deberán estar totalmente limpios y en caso de ser necesario, más de uno deberá estar separado entre sí, por lo menos 6 m. La resistencia obtenida de un electrodo de tierra no debe exceder de 2 ohm. En caso que un electrodo no cumpla esta condición, deberán ponerse tantos electrodos como sea necesario para alcanzar este valor. Se recomienda medir inmediatamente los valores de resistencia de tierra.

2.26 CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA

El conductor de puesta atierra debe ser de cobre u otro material resistente a la corrosión, puede ser macizo o prensado, aislado o desnudo, no debe tener en toda su longitud ningún

empalme o unión excepto sí sé tarta de barra bus. Si el conductor no es de cobre la resistencia mecánica y la resistencia óhmica por unidad de longitud deben ser equitativamente a la de este.

Para secciones iguales o superiores al número 4 AWG se puede fijar el conductor de tierra directamente sobre la superficie en la cual va colocada, sin utilizar aisladores. No necesita tener protecciones a menos que esté expuesto a fuertes daños mecánicos. Los conductores número 6 AWG, pueden tenderse sin daños mecánicos.

Para todas las secciones inferiores al número 6 AWG, los conductores deben ir protegidos por conductos. Se podrá emplear la misma canalización de los conductores de alimentación del circuito para llevar el conducto de tierra.

TABLA 250-66.- Conductor del electrodo de puesta a tierra para sistemas de corriente alterna

Tamaño del mayor conductor de entrada a la acometida o área equivalente para conductores en paralelo[a]				Tamaño del conductor al electrodo de puesta a tierra			
Cobre		Aluminio		Cobre		Aluminio[b]	
mm^2	AWG o kcmil	mm^2	AWG o kcmil	mm^2	AWG o kcmil	mm^2	AWG o kcmil
33.6 o menor	2 o menor	53.50 o menor	1/0 o menor	8.37	8	13.3	6
42.4 o 53.5	1 o 1/0	67.40 o 85.00	2/0 o 3/0	13.3	6	21.2	4
67.4 o 85.0	2/0 o 3/0	107 o 127	4/0 o 250	21.2	4	33.6	2
Más de 85.0 a 177	Más de 3/0 a 350	Más de 127 a 253	Más de 250 a 500	33.6	2	53.5	1/0
Más de 177 a 304.0	Más de 350 a 600	Más de 253 a 456	Más de 500 a 900	53.5	1/0	85.0	3/0
Más de 304 a 557.38	Más de 600 a 1100	Más de 456 a 887	Más de 900 a 1750	67.4	2/0	107	4/0
Más de 557.38	Más de 1100	Más de 887	Más de 1750	85.0	3/0	127	250

Cuando no hay conductores de acometida, el tamaño del conductor del electrodo de puesta a tierra se deberá determinar por el tamaño equivalente del conductor más grande de acometida requerido para la carga a alimentar.
[a] Esta tabla también aplica para los conductores derivados de sistemas derivados separados de corriente alterna.
[b] Ver 250-64(a) para restricciones de la instalación.

Tabla 3 calibre de conductor de puesta a tierra

La sección para los conductores de tierra de servicio o conductores de tierra común en instalaciones inferiores, no debe ser inferior al valor dado en la tabla.

2.27 METODOS DE PRUEBA BASICOS PARA MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA

La mayoría de los instrumentos existentes para la medición de la resistencia a tierra, se basan en el método de la caída de potencial.

2.27.1 **Método de caída de potencia**

El método de caída de potencial es el método “tradicional” de medida de la resistencia de la toma de tierra, y es el que utilizan los equipos conocidos como “telurómetros”.
Se debe recordar que para medir la resistencia de la toma de tierra empleando este método, es necesario desconectar previamente el electrodo de puesta a tierra de la instalación, maniobra que se ejecuta en el borne principal de tierra que, generalmente, está ubicado en el cuarto de contadores de la instalación

Este método también denominado de tres puntos, se realiza con tres terminales y se describe previamente con referencia a la figura siguiente.

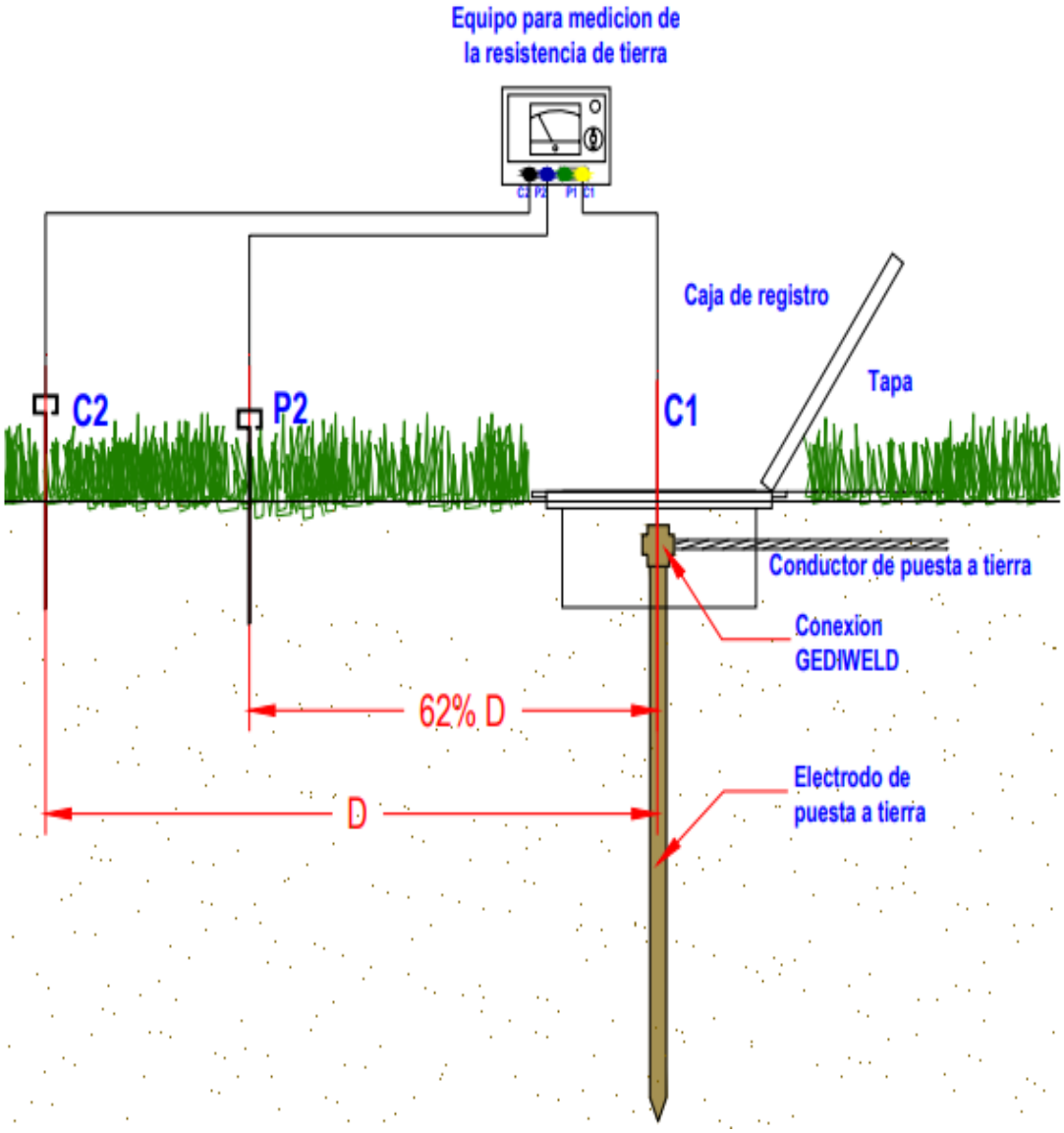


Ilustración 12 método de caída de potencia

Este método se realiza con tres puntas de prueba o electrodos separados, las cuales se conectan a los tres terminales del instrumento para medición de la resistencia a tierra como se muestra en la figura anterior. Es importante aclarar que en la figura se aprecia que la tercera punta de prueba es un electrodo fijo y no removible, esto es indicativo de que este método al igual que el anterior no solo es para mediciones iniciales sino también puede ser usado para corroborar mediciones anteriores o el estado de una puesta a tierra existente.

Empleando un probador de cuatro terminales, los terminales P1 y C1 en el instrumento son puenteados y conectados al electrodo de tierra bajo prueba o al tercer electrodo de referencia. Si se dispone de un instrumento de tres terminales, solo conecte el terminal X al electrodo a tierra. Posteriormente, se colocan las otras dos puntas de prueba auxiliares en los terminales C2 y P2 y varillas de prueba enterradas a distancias predeterminadas del electrodo bajo prueba.
Al accionar el instrumento, se genera una corriente que se inyecta por los terminales C1/P1 retornando por el electrodo auxiliar de corriente (C2). Al pasar la corriente por la tierra, una caída de voltaje se generará entre los terminales C1/P1 y el electrodo auxiliar de potencial conectado en P2. El instrumento calcula la resistencia a través de la ley de ohm.

$$R=V/I$$

Donde

- R = Resistencia a tierra
- V = Voltaje leído entre el electrodo C1/P1 y el terminal P2
- I = Corriente de prueba inyectada por el instrumento

Este método demanda que por lo menos exista un espaciamiento entre C1/P1 y C2 de unos 15 m y que se grafiquen los valores de resistencia obtenidos contra la distancia existente entre el electrodo a prueba y la varilla conectada a P2. En la práctica esta distancia entre C1/P1 y C2 debe ser lo más grande que es posible.

Al elaborar la gráfica, la misma mostrara un incremento gradual de resistencia a tierra mientras P2 está en la zona cercana al electrodo bajo prueba. Cuando P2 sale de esa zona, pero no ha entrado en la zona de C2, la gráfica mostrará una meseta en los valores. Este aplanamiento obtenido se

ha demostrado teóricamente que se logra cuando P2 está localizado al 62% de la distancia entre el electrodo bajo prueba y C2. Esta es la razón por la que también se le llama a este método el "de 62%". Pruebas realizadas por Michaels demuestran que la variación de las lecturas obtenidas al 50% y al 70% de la distancia es menor al 5%, que es la precisión de la mayoría de los instrumentos más comunes. De ahí que las lecturas que se toman al 60% pueden dar una medida promedio aceptable de la resistencia a tierra del electrodo incluyendo la resistencia del conductor de conexión al electrodo bajo prueba.

Sin embargo, este método tiene la limitante de que depende en gran medida de enterrar los electrodos en una zona alejada de objetos conductores. Si la curva en la gráfica, no presenta un tramo paralelo, quiere decir que la distancia escogida no es suficiente.

La solución puede ser una mayor distancia entre electrodos, pero, en algunos casos, la localización de los electrodos en línea recta es imposible por la falta de espacio u otros factores. Pero, en el artículo se demuestra que colocando el electrodo de prueba P en ángulos hasta de 90 grados da lecturas consistentes con las que se obtendrían en línea recta, aunque en la gráfica los valores de resistencia después de distancias mayores al 70% no suben con igual rapidez, debido a la lejanía del electrodo C2.

El uso de tres terminales es más conveniente debido a que requiere que un solo conductor sea conectado. Su aceptación considera que la resistencia del conductor común está incluida en la medición. Normalmente, este efecto puede ser minimizado si los requerimientos de las pruebas no son mayores, ya que la pequeña resistencia adicional introducida es casi nula. Sin embargo, cuando se realizan pruebas más complejas o se impongan requerimientos más rígidos, puede ser más aconsejable utilizar todos los cuatro terminales, conectando el terminal P1 con el electrodo a ser probado (conectarlo en la varilla después de C1). Esta es una verdadera configuración de prueba de cuatro hilos, la cual elimina todas las resistencias de los cables de conexión desde el equipo.

2.27.2 **Método de Dos Puntos**

Este método resulta de una simplificación del expuesto precedentemente. En este caso, se mide la resistencia total de la toma de tierra bajo ensayo y de otra toma auxiliar, cuya resistencia de tierra se presupone despreciable frente a la primera.
Como es de esperar, el valor de resistencia que se obtiene de esta manera está sujeto a grandes errores cuando se usa para medir resistencias pequeñas, pero en algunas ocasiones es muy práctico para los ensayos "por sí o por no"

Cuando se emplea un instrumento de cuatro terminales, se puentean los terminales P1 y C1 conectándose al electrodo a tierra bajo prueba y los terminales P2 y C2 se puentean conectándose a un sistema de tubos de agua completamente metálico. Con un instrumento de tres terminales, conecte X al electrodo a tierra, P y C al sistema de tubos. Si el sistema de agua es extenso (que cubre un área grande), su resistencia sola debe ser una fracción de un ohm. Después puede tomar la lectura del instrumento como la resistencia del electrodo bajo prueba.

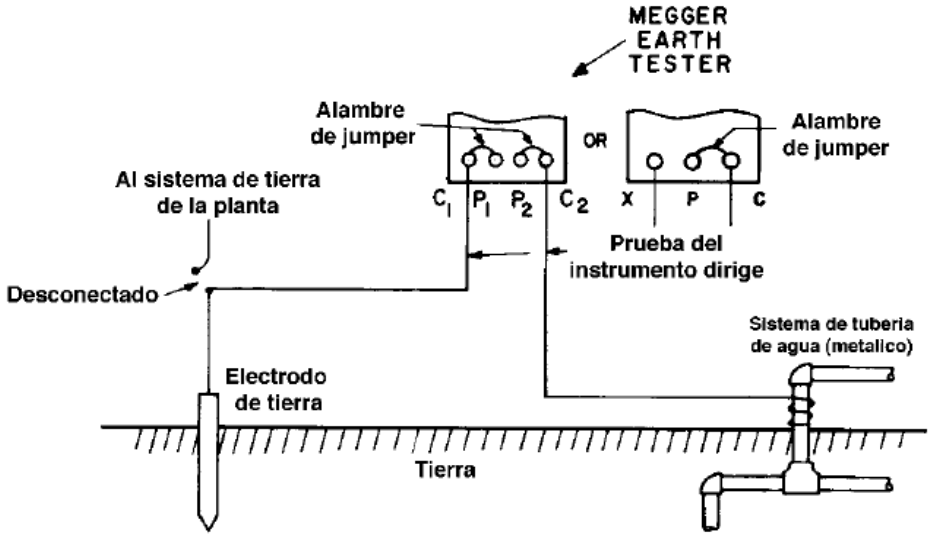


Ilustración 13 método de dos puntos

El método directo es la forma más simple de hacer una prueba de resistencia a tierra. Con este método, la resistencia de dos electrodos en serie se mide – la varilla enterrada y el sistema de agua.

Pero existen tres limitaciones importantes:

- El sistema de tubos de agua debe ser lo suficientemente grande para tener una resistencia despreciable.
- El sistema de tubo de agua debe ser metálico en su totalidad, sin ningunos acoplamientos o flanges de aislamiento.

- El electrodo de tierra bajo prueba debe estar lo suficientemente lejos del sistema de tubo de agua para quedar fuera de su esfera de influencia.

En algunos lugares, su electrodo a tierra puede estar tan cerca del sistema de tubos de agua que no se puedan separar a los dos y dar la distancia requerida

para medición por medio del método de dos terminales. Bajo estas circunstancias, si se cumplen las condiciones 1 y 2, se puede conectar al sistema de tubos de agua y obtener un electrodo a tierra adecuado. Sin embargo, como precaución contra cualquier posible cambio futuro en la resistencia del sistema de tubos de agua también se debe instalar un electrodo de tierra.

2.27.3 **El método de medida en triángulo (dos picas)**

Este método requiere el uso de dos electrodos auxiliares (o "picas"). Este método se utiliza cuando el método descrito anteriormente no puede aplicarse (no se puede conseguir una alineación o un obstáculo impide un alejamiento suficiente de H).

Consiste en:

- clavar las picas S y H al igual que la toma de tierra E, formando las picas S y H un triángulo equilátero,
- efectuar una primera medida colocando S por un lado, luego una segunda medida colocando S por el otro lado.

Si los valores obtenidos son muy diferentes, la pica S se encuentra en una zona de influencia. Se debe por lo tanto aumentar las distancias y volver a realizar las medidas. Si los valores obtenidos son próximos, a unos pocos %, puede considerarse que la medida es correcta. Sin embargo, este método proporciona resultados inciertos. En efecto, aun cuando los valores obtenidos son próximos, las zonas de influencia pueden confundirse. Para asegurarse de ello, vuelva a realizar las medidas aumentando las distancias.

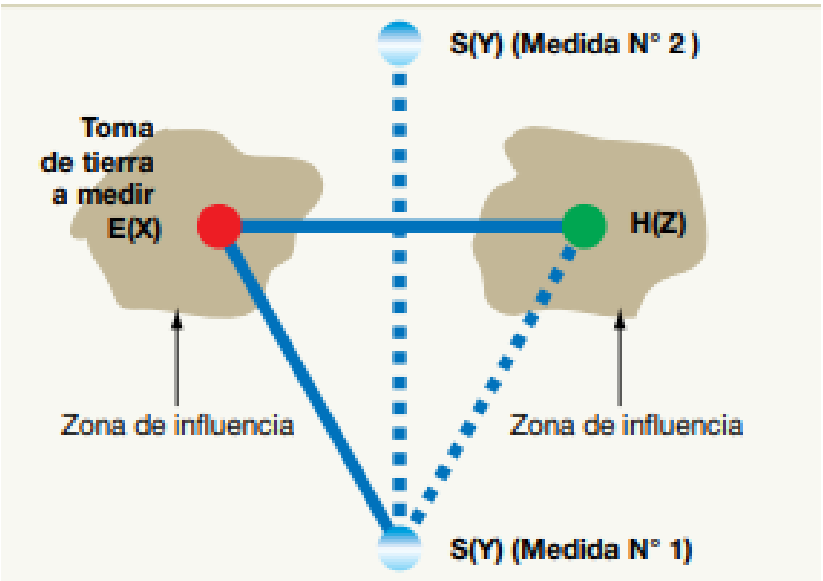


Ilustración 14 método medida de triangulo

2.27.4 **La medida de tierra por método de 4 polos**

La medida de tierra de 4 polos se basa en el mismo principio que la medida de 3 polos, pero con una conexión adicional entre la tierra a medir E y el instrumento de medida. Así, este método permite obtener una mejor resolución (10 veces mejor que la medida 3 P) y librarse de la resistencia de los cables de medida.

Esta función es ideal para las medidas de resistencia de tierra muy débiles y, por consiguiente, conviene especialmente para los transportistas y distribuidores de energía que necesitan medir resistencias de tierra de pocos ohmios.

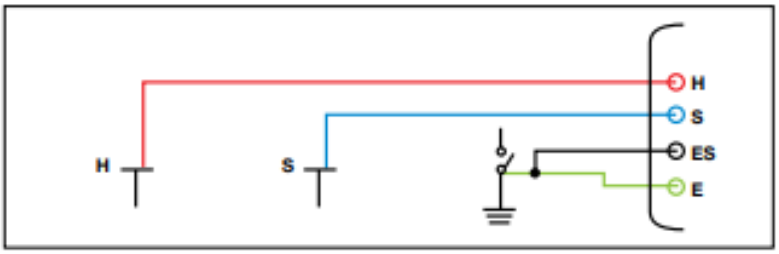


Ilustración 15 método de medida de 4 polos

2.27.5 **La regla de 62%**

es posible reducir el número de medidas a realizar si:

- Se comprueba un electrodo simple (no una malla ni una placa grande).
- Es posible colocar la pica de inyección de corriente a una distancia igual o superior a 30 m desde el electrodo que se está comprobando.
- El terreno es uniforme.

En estas condiciones, se puede colocar la pica de inyección de corriente a una distancia igual o superior a 30 m del electrodo que se está comprobando, y la pica de referencia de tensión al 62% de dicha distancia. Se realiza una medida y, a modo de comprobación, se deben realizar dos medidas adicionales: una con la sonda de referencia de tensión 1 m más cerca del electrodo que se está comprobando y otra 1 m más alejada. Si realmente se está en

la parte plana de la curva, las lecturas deben ser prácticamente iguales y se podrá registrar la primera lectura como valor de la resistencia.

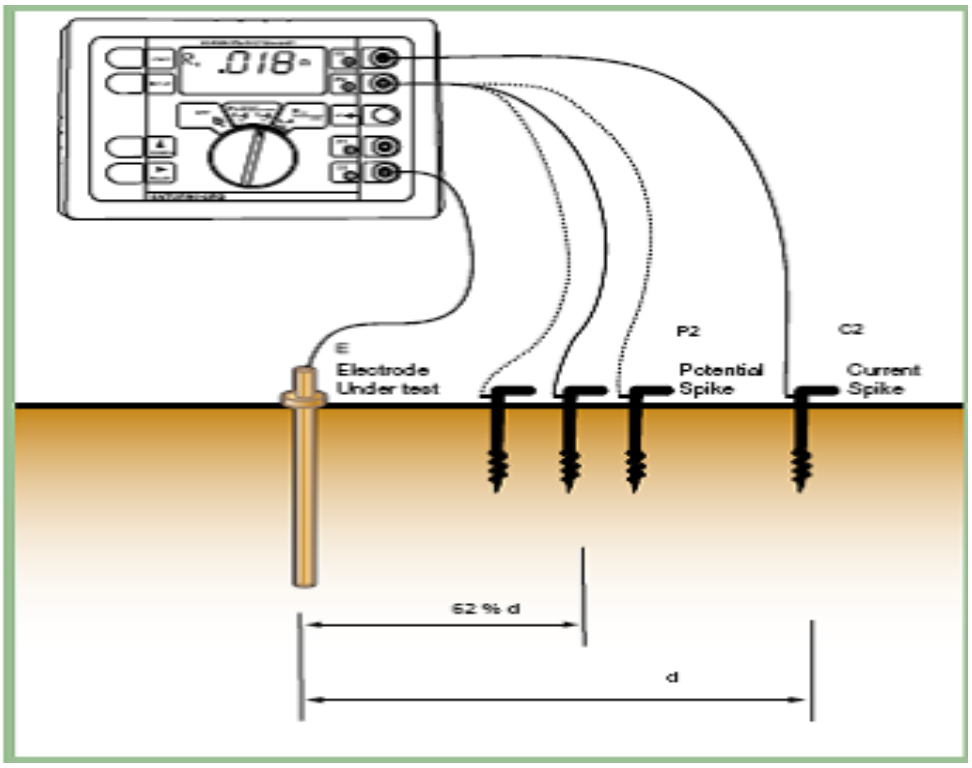
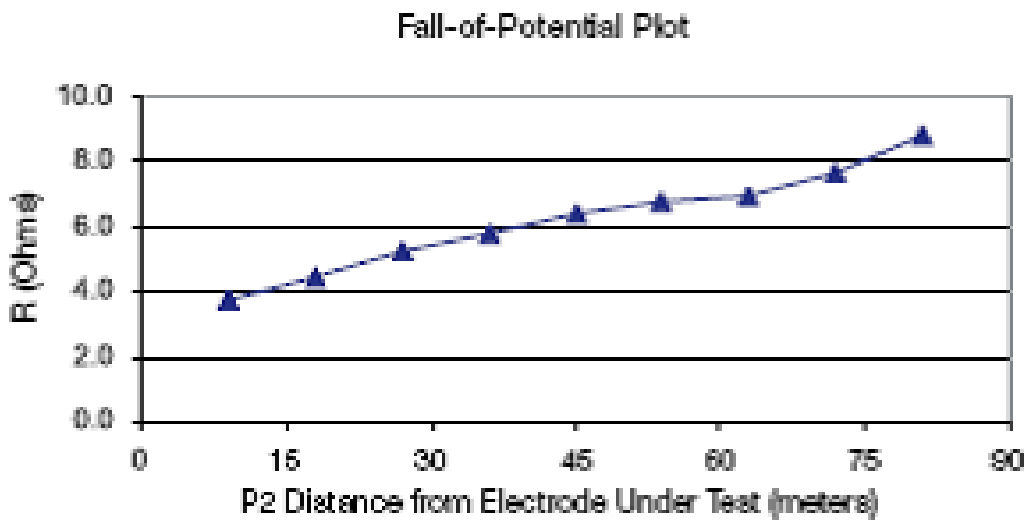


Ilustración 16 regla del 62%

Distance From Electrode Under Test			Resistance
C2 (m)	P2 (m)	P2/C2	R (ohms)
100	10	10%	3.7
100	20	20%	4.4
100	30	30%	5.3
100	40	40%	5.8
100	50	50%	6.5
100	60	60%	6.8
100	70	70%	7.0
100	80	80%	7.7
100	90	90%	8.8

Tabla 4 datos de impedancia



Grafica 8 pendiente de tagg

2.28 METODOS INVOLUCRADOS EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE TIERRA

La resistencia a tierra de cualquier sistema de electrodos teóricamente puede calcularse de las fórmulas basadas en la formula general de la resistencia:

$$R = \rho LA$$

En donde:

- ρ es la resistividad de la tierra en ohm-cm
- L es la longitud de la trayectoria de conducción
- A es el área transversal

Hay que tener presente las observaciones previas con referencias al diagrama de capas de tierra con la distancia cada vez mayor desde un electrodo, las capas de tierra son de área de superficie mayor y por lo tanto de menor resistencia.

Presumamos que se tienen tres varillas enterradas en la tierra a una cierta distancia separadas y con un voltaje aplicado, la corriente entre las varillas 1 y 2 se mide con un amperímetro, la diferencia de potencial (voltaje) entre las varillas 1 y 3 se mide con un voltímetro. Si la varilla 3 se ubica más cerca de la varilla 3 en varios puntos entre las varillas 1 y 2, preferiblemente en línea recta se puede obtener una serie de lecturas de voltaje.

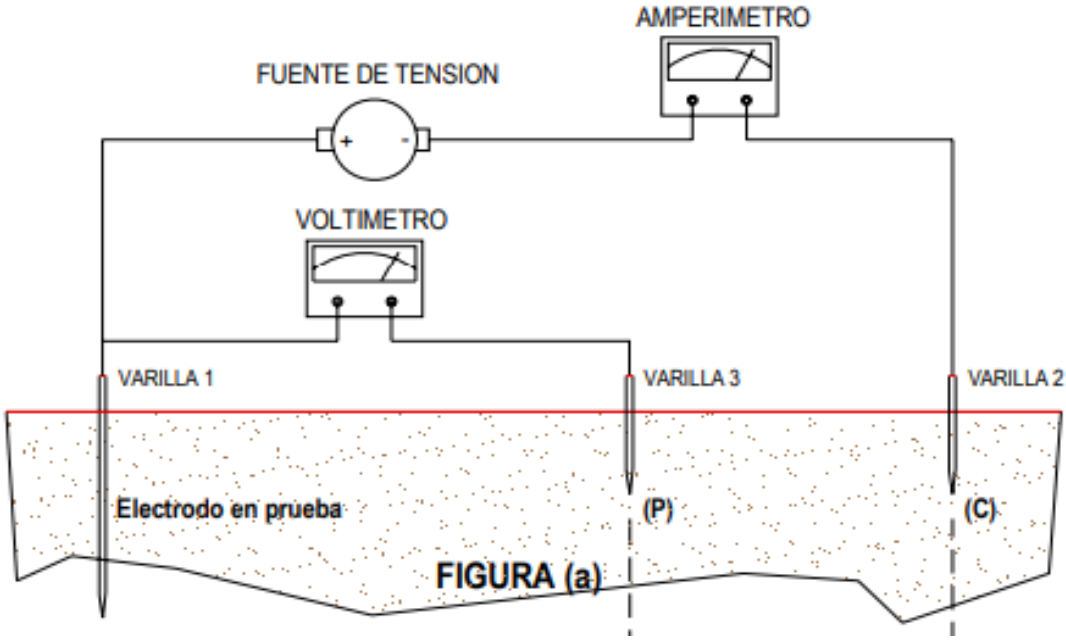


Ilustración 17 representación de conexión de amperímetro y voltímetro

Por la ley de ohm R=V/I se puede determinar la resistencia de la tierra en cualquier punto medido. Por ejemplo, si el voltaje medido V entre las varillas 1 y 3 es 28 voltios y la corriente medida I es 2 amperes, la resistencia de la tierra R en ese punto seria 14 ohm.

Una serie de valores de la resistencia puede graficarse contra la distancia para obtener una curva de comportamiento del suelo tal como se aprecia en la siguiente figura.

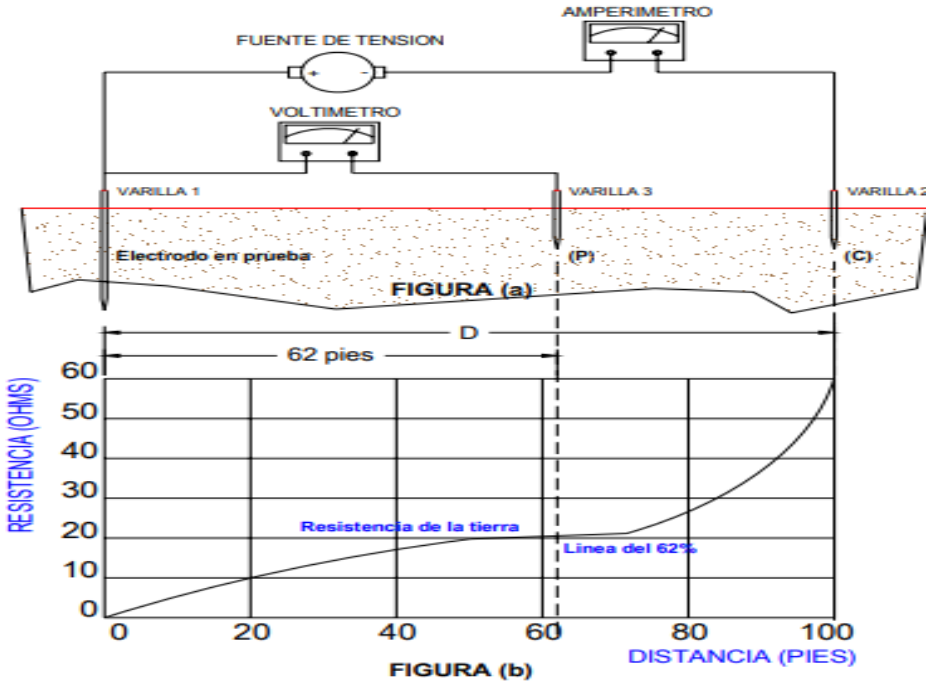


Ilustración 18 representación gráfica e ilustrativa

Como se puede 0bservar que a medida que la varilla 3 se mueve lejos de la varilla 1, los valores de la resistencia aumentan, pero la cantidad de incremento se va disminuyendo cada vez más hasta que se alcanza el punto donde el valor de incremento se vuelve tan pequeño que casi puede considerarse constante, unos 20 ohm, tal como se puede ver en la Figura.

Las capas de tierra entre las varillas 1 y 3 tienen un área de superficie tan grande que añaden poco a la resistencia total. Más allá de este punto, a medida que la varilla 3 se acerca a las celdas de tierra de la varilla 2, la resistencia gradualmente se eleva.

Cerca de la varilla 2, los valores suben de manera violenta. Ahora, digamos que la varilla 1 es nuestro electrodo de tierra bajo prueba. De una curva de resistencia a tierra típica.

Por último, C debe estar lo suficientemente lejos del sistema de electrodos a tierra de modo que el 62% de la distancia este fuera de la “Esfera de Influencia” del electrodo de tierra.

2.29 MÉTODOS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE TIERRA

Cuando la resistividad del terreno es muy elevada, y en donde los electrodos no pueden enterrarse profundamente debido a rocas se utilizan diversos métodos para mejorar las condiciones. En general todos los métodos tratan de crear una mejor conductividad en las primeras capas o cilindros de tierra que rodean al electrodo, en donde la superficie conductora es pequeña. El tratamiento también es beneficioso al independizar el valor de resistencia obtenida de las variaciones climáticas.

El articulo 250-84 del CEN permite para los sistemas con un electrodo único que conste de una varilla, tubería o placa, que no tiene una resistencia a tierra de 25 ohms o menos, que se complemente con electrodos adicionales separados por lo menos una distancia de 1,83 m entre sí. En la práctica, cuando encuentra que la resistencia de su electrodo a tierra no es suficientemente baja, Los métodos más comunes para mejorarla son:

- Usando una varilla de mayor diámetro.
- Usando electrodos más largos
- Colocando dos, tres o más electrodos en paralelo
- Electrodos profundos
- Reducción de la resistividad del suelo tratando químicamente el terreno.
- Agregado de sales simples.
- Agregado de coque.
- Aporte de sales "gel".
- Inyección de bentonita.
- Inyección de resinas sintéticas.

La necesidad de tratar el terreno, previamente, donde se instalará un electrodo ha sido y es todavía tema de discusión.

Los métodos principales usados para mejorar la resistividad del terreno alrededor de los electrodos son:

Humedecer con agua y sales minerales (cloruro de sodio o sulfato de cobre, sulfato de magnesio), en la fosa que circula el electrodo. Es difícil afirmar hasta donde se manifiestan los beneficios de las sales introducidas en la solución y dónde donde empiezan los beneficios debido al aumento de la humedad del terreno. En la elección de las sales hay que tener presente los fenómenos de corrosión que pueden presentar la superficie del electrodo, siendo dañino y costoso, resultado perjudicial el hecho de bajar la resistencia.

Volcar en una zanja larga alrededor del electrodo, discreta cantidad de sales minerales. El agua de lluvia disuelve paulatinamente estas sales, llevándolas hacia la profundidad, lo que provoca un mejoramiento de la resistencia del electrodo, por tiempo más o menos largo. La duración de este sistema es evidentemente más larga que el método anterior, presentando también peligro de corrosión. Rodear el dispersor de carbón vegetal triturado. Este método se puede aplicar con el electrodo de plancha. Si bien mantienen los efectos en el tiempo, presenta los mismos inconvenientes de corrosión.

El hecho de bajar la resistencia del terreno, incurrimos en el peligro de corrosión de los electrodos por efectos de testamento previos del terreno.

2.30 TRATAMIENTO QUÍMICO DEL SUELO

El tratamiento químico del suelo es un buen modo para mejorar la resistencia a tierra cuando no se pueden enterrar más profundamente los electrodos de tierra (a causa de roca dura subyacente.)

Cuando la resistencia a tierra no es lo suficientemente baja, y los métodos anteriores no son posibles, se tiene que mejorar el terreno mismo mediante productos químicos. Pero, tiene el

inconveniente de ser una solución costosa y que bajo ciertas circunstancias se requiere de mantenimiento.

El problema de lograr una resistencia baja en la roca, así como en otros suelos de alta resistividad, está asociada con el material en contacto con el electrodo y la compactación que éste recibe al rellenar el agujero.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, no ser corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico, los más utilizados son: la bentonita, compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, compuestos químicos patentados como THOR GEL, el GEM de Erico, el GAP de Alta Conductividad 2000 S.A, etc.

Naturaleza del suelo	Resistividad promedio (Ω.m)
Terreno Húmedo o suelo orgánico	10 – 50
Terreno de cultivo o arcilloso	50 – 100
Tierra arenosa Húmeda	100 – 200
Tierra arenosa seca	200 – 1000
Tierra con guijarros y cemento	200 –1000
Roca cristalina	50 – 500
Arena y grava	50 – 1000
Roca porosa	20 – 2000
Suelo rocoso húmedo	2000 – 3000
Granito basalto, etc.	1000
Roca compacta	10000

Tabla 5 resistencia del suelo

2.31 MÉTODO DE TRINCHERAS PARA LA PREPARACIÓN DEL TERRENO

Esta más allá del objetivo de este manual recomendar los mejores químicos de tratamiento para todas las situaciones. Tiene que considerar el posible efecto corrosivo en el electrodo. El sulfato de magnesio, sulfato de cobre, y sal de roca ordinaria son materiales no corrosivos adecuados. El sulfato de magnesio es menos corrosivo, pero la sal de roca es más barata y hace el trabajo si se aplica en una zanja excavada alrededor del electrodo como se observa en la siguiente figura.

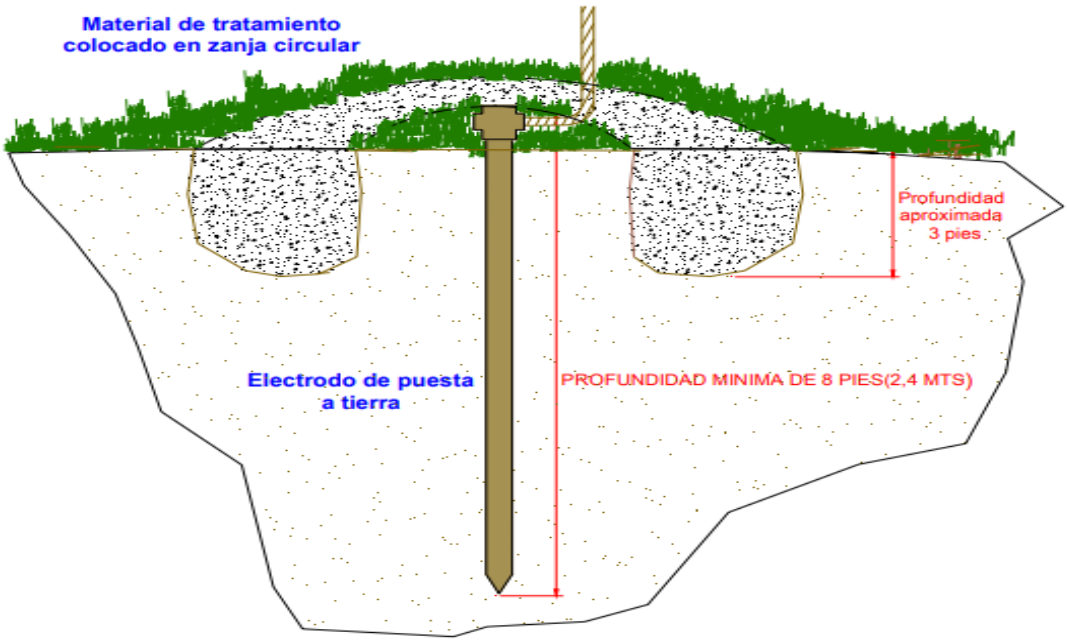


Ilustración 19 método de trincheras para la preparación del terreno

El tratamiento químico no es un modo permanente de mejorar su resistencia a tierra. Los químicos son deslavados gradualmente por la lluvia y drenaje natural a través del suelo. Dependiendo de la porosidad y la cantidad de lluvia, el periodo de reemplazo varía. Pueden pasar varios años antes que sea necesario otro tratamiento.

El tratamiento químico también tiene la ventaja de reducir la variación estacional en la resistencia que resulta del mojado periódico y secado del suelo. Sin embargo, solo debe considerar este método cuando los electrodos múltiples o profundos no sean prácticos.

2.32 MATERIALES ACEPTABLES DE BAJA RESISTIVIDAD

Como se mencionó previamente, la tierra tamizada fina o tierra de moldeo normalmente es un material de relleno apropiado para rodear el electrodo enterrado. Para situaciones especiales, hay diversos materiales, como los siguientes:

Refuerzo de tierra gem.

GEM mejora el desempeño de las puestas a tierra sin importar las condiciones del suelo. Lo que lo convierte en el material ideal para usar en lugares de baja conductividad, como suelo rocoso, suelo arenoso y cimas de montañas.

Este producto es el producto indicado para aquellas ocasiones en las que:

- Cuando no se puede enterrar varillas a tierra.
- Cuando las limitaciones de la superficie del suelo dificultan la puesta a tierra adecuada mediante métodos convencionales

GEM es el ideal para disminuir la resistencia a tierra y mantenerla baja de forma permanente.

El material que compone este sistema cuenta con las siguientes características distintivas:

- No es un material corrosivo.
- Cuenta con una resistencia baja**.**
- Está compuesto de polvo de carbón, por lo que permite optimizar la eficiencia del Sistema de Puesta a Tierra en el que se aplique en especial en aquellas zonas en las que la conductividad es sumamente baja.
- Está en cumplimiento con la normativa IEC 62561-7.
- Contiene cemento Portland, el cual al fraguar se endurece y transforma en un concreto conductivo para facilitar que la instalación esté libre de mantenimiento y el Sistema de Puesta a Tierra cuente con valores de resistividad mínimos para que el GEM nunca se filtre o deslave

Bentonita.

Es una arcilla color pardo, de formación natural, que es levemente acida, con un pH de 10,5. Puede absorber casi cinco veces su peso de agua y de este modo, expandirse hasta treinta veces su volumen seco. Su nombre químico es montmorillonita sódica. En terreno, puede absorber humedad del suelo circundante y ésta es la principal razón para usarla, ya que esta propiedad ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo del año. Tiene baja resistividad aproximadamente 5 ohm - metro y no es corrosiva.

Bajo condiciones extremadamente secas, la mezcla puede resquebrajarse ofreciendo así poco contacto con el electrodo. La Bentonita es de carácter tixotrópica y por lo tanto se encuentra en forma de gel en estado inerte. La Bentonita se usa más a menudo como material de relleno al enterrar barras profundas. Se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente.

Marconita

Es esencialmente un concreto conductivo en el cual un agregado carbonáceo reemplaza el agregado normal usado en la mezcla del concreto. Tiene algunas propiedades similares a la bentonita, es decir, provoca poca corrosión con ciertos metales y tiene baja resistividad. Fue desarrollada como un proceso que se inició en 1962 cuando ingenieros de Marconi descubrieron un material que conducía por movimiento de electrones más bien que de iones. Contiene una forma cristalina de carbón y el material global tiene bajo contenido de sulfato y cloruro.

Se ha declarado que hay algo de corrosión de materiales ferrosos y de cobre mientras la Marconita está en forma ligosa, pero también se ha sugerido que forma una capa protectora delgada. Cuando el concreto ha fraguado, se dice que la corrosión cesa. Idealmente, en el punto de ingreso a la estructura Marconita, el metal debe pintarse con bitumen o una pintura bitumástica para prevenir la corrosión en ese punto. El aluminio, el acero galvanizado o con una capa de estaño, no deben instalarse en Marconita.

Cuando la Marconita se mezcla con concreto, su resistividad puede bajar tanto como a 0,1 ohm-metro. Mantiene su humedad aún bajo condiciones muy secas, de modo que ha sido usada en los climas más cálidos como una alternativa a la Bentonita.
Su aplicación se centra para encerrar electrodos en perforaciones o espacios en el interior de rocas. También es probable que los espacios se llenen parcialmente con otros materiales tales como concreto para reducir la cantidad de material patentado que se requiera.

Normalmente se considera que la Marconita tiene una resistividad de 2 ohm-metro. También se usa la Marconita algunas veces para piso antiestático y apantallamiento electromagnético.

Yeso

Ocasionalmente, el sulfato de calcio (yeso) se usa como material de relleno, ya sea solo o mezclado con Bentonita o con el suelo natural del área. Tiene baja solubilidad, por lo tanto, no se desprende fácilmente lavándolo y tiene baja resistividad (aproximadamente 5- 10 ohm-metro en una solución saturada). Es virtualmente neutro, con un valor de pH entre 6,2 y 6,9.

Se presenta en la naturaleza en forma natural, de modo que su uso generalmente no provoca dificultades ambientales. Se asegura que no causa corrosión con el cobre, aunque algunas veces el pequeño contenido de SOS ha causado preocupación por su impacto en estructuras de concreto y fundaciones (cimientos). Es relativamente barato y normalmente se mezcla con el terreno para formar un relleno alrededor del electrodo de tierra.

Se asegura que ayuda a mantener una resistividad relativamente baja durante un largo período de tiempo, en áreas donde las sales existentes en la vecindad se disuelvan rápido por movimiento de agua. Sin embargo, el hecho de que el material no se disuelva fácilmente moderará los beneficios obtenidos, ya que no penetrará difundiéndose en la tierra. Esto significa que el efecto beneficioso estará localizado digamos en un área excavada en torno a un electrodo enterrado.

2.33 EFECTO DEL TAMAÑO DEL ELECTRODO

Efectos por el largo del electrodo.

Como se puede sospechar, enterrando un electrodo largo más dentro de a tierra, decrece materialmente su resistencia. En general, doblar la longitud de la varilla reduce la resistencia aproximadamente en un 40%.

Efecto del largo del electrodo en la resistencia a tierra, muestra este efecto, por ejemplo, observe que una jabalina enterrada dos pies tiene una resistencia de 88 ohm, mientras que la misma jabalina enterrada el doble tiene una resistencia de alrededor de 50 ohm.

Empleando la regla de reducción a 40%, 88 x 0.4 =35 ohm de reducción. Una varilla de 4 pies de profundidad, por este cálculo tendría una resistencia de 88–35 ó 53 ohm comparándose muy cercanamente a los valores de la curva que se muestra a

continuación

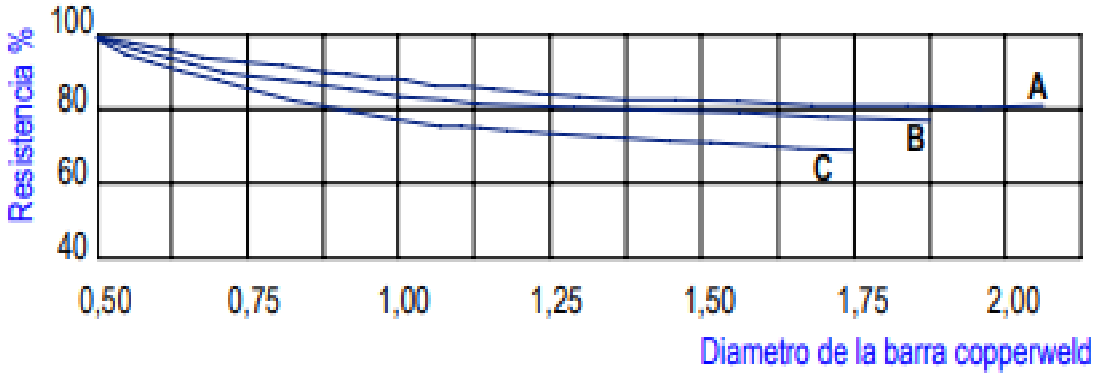
Grafica 9 efecto del tamaño del electrodo

2.31.1 **Efectos por el diámetro del electrodo**

Partiendo del mismo principio estudiado del efecto del largo del electrodo, también podría pensarse que incrementando el diámetro del mismo disminuye la resistencia. En realidad, lo hace, pero en muy poca medida si los comparamos. El aumento del diámetro del electrodo que es lo que comúnmente se hace, no disminuye proporcionalmente la resistencia eléctrica del electrodo.

Principalmente es el suelo que rodea la jabalina el que determina la resistencia. Los ensayos en este tema han demostrado que la diferencia de resistencia obtenida entre las jabalinas disponibles comercialmente es despreciable. Para la misma profundidad, doblar el diámetro de la barra copperweld o jabalina reduce la resistencia solo 10%.

Efecto del diámetro del electrodo en la resistencia a tierra muestra esta relación. Por ejemplo, una jabalina de 5/8 de pulgada de diámetro tiene una resistencia de 6.33 ohm, si aumentamos su diámetro a 1-1/4 pulgada la resistencia disminuye solo a 5.6 ohm. Es decir, un 10% mientras que el peso el cual determina el precio es el doble. Por esta razón, normalmente solo considere incrementar el diámetro de la varilla si tiene que enterarla en terrenos duros.



A - Ensayos del Bureau of Standards
B - Promedio de ensayos Underwriters Laboratories of Chicago
C - Promedio de ensayos Underwriters Laboratories of Pittsburgh

grafica 10 resistencia en % respecto al diámetro de la barra copperweld

Por lo tanto, la determinación del diámetro de la jabalina depende de la resistencia mecánica del terreno.
Es importante que la jabalina tenga buena resistencia mecánica para lograr un fácil hincado sin problemas de pandeo y una eficaz protección contra la corrosión para tener una gran duración.

Las jabalinas tipo copperweld tienen una resistencia a la rotura de 50 kg/mm² y una gruesa capa de cobre. Como dato ilustrativo en la mayoría de los terrenos se pueden hincar sin problemas jabalinas de 1/2” ×3 mts., para terrenos más duros es aconsejable 5/8” ò 3/4” dependiendo del mismo.

2.31.2 **Uso de electrodos múltiples**

Cuando enterramos dos electrodos bien espaciados en la tierra, estos proporcionan caminos paralelos. Son en efecto, dos resistencias en paralelo. No obstante, la regla para dos resistencias en paralelo no se aplica exactamente; esto significa que la resistencia resultante no es la mitad de la resistencia de un electrodo individual, esto suponiendo que sean del mismo diámetro y largo.

Realmente, la reducción de dos electrodos de igual resistencia es próxima al 40%. Si se emplean tres electrodos la reducción es cercana al 60%, y si se utilizan cuatro será alrededor del 66%.

Como se puede apreciar en la siguiente Figura Resultados obtenidos del uso de electrodos múltiples en la medida en que vamos adicionando barras copperweld al terreno la resistencia disminuye en los porcentajes que se indican.

Cuando se emplean múltiples electrodos, estos deben espaciarse más que la longitud de su inmersión. Existen razones teóricas para esto, pero solo necesita referirse a las curvas tales como las de la Figura.

Por ejemplo, si tiene dos electrodos en paralelo y un espaciamiento de 10 pies, la resistencia se disminuye aproximadamente en un 40%. Si el espaciamiento se incrementa al doble la reducción es aproximadamente 50%.

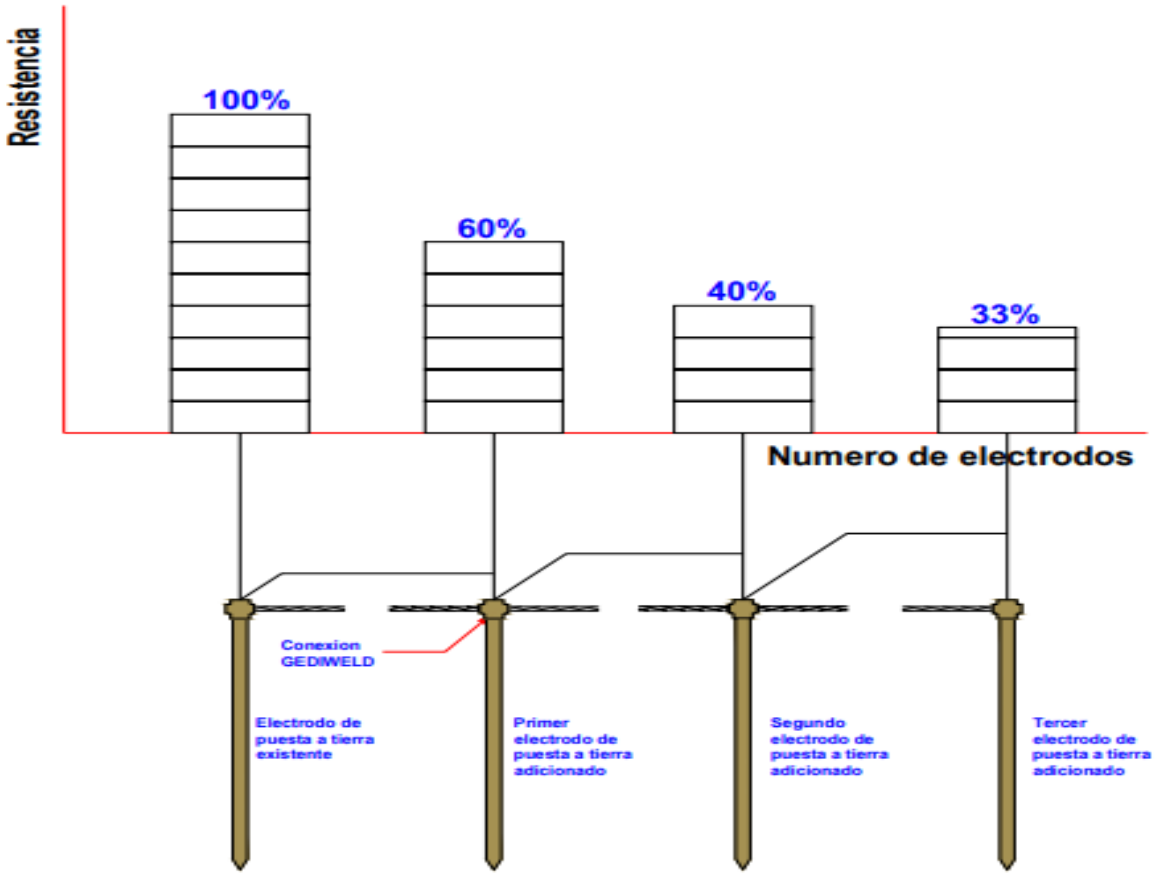


Ilustración 20 uso de electrodos múltiples

2.34 CONECTORES Y ACCESORIOS PARA LA RED DE TIERRAS

Los conectores son los elementos que permiten unir todo el sistema de Puesta a Tierra y deben tener la capacidad de soportar altas corrientes, esfuerzos electromecánicos y sobrecalentamientos.

Las conexiones entre los conductores de la red aseguran el adecuado control de potenciales en la superficie, también contribuyen a formar trayectorias múltiples para disipar la corriente de falla, limitando las diferencias de tensión en la propia red y proporcionan cierta redundancia en el caso de que se desconecte algún conductor.

Son elementos que sirven para unir a la red de tierra los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc. Los conectores de conductores de puesta a tierra con los electrodos pueden ser del tipo de soldadura exotérmica, conectores a presión, abrazaderas u otros medios aprobados por la Norma Oficial Mexicana y no deben tener soldaduras con materiales de puntos de baja fusión (estaño, plomo, etc.) para evitar falsos contactos, ya que pierde características de seguridad la malla, si se llegara a abrir.

En nuestro país, se prefieren las conexiones exotérmicas (de marcas: Cadweld, Thermoweld, o Mexweld) para redes de tierras de subestaciones de alta potencia. Las abrazaderas a usarse en sistemas de puesta a tierra deben ser adecuadas para el número y tipo de conductores. Además, deben de ser compatibles con los materiales de los conductores y los electrodos de puesta a tierra, y cuando se usen enterradas, deben ser del tipo apropiado, generalmente BURIED.

2.28 **Tipos de conectores y accesorios**

Los conectores generalmente utilizados son de dos tipos: a presión y soldados.

Los conectores del “tipo a presión”, incluyen aquellas conexiones que mediante presión mantienen el contacto del conductor del sistema de tierra con el conector.

En este tipo están comprendidos los de tornillo ó mecánicos y los de compresión.

Los conectores atornillables ó mecánicos se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material se fabrica de bronce al silicio para proporcionar alta resistencia mecánica y a la corrosión.

La utilización del bronce, que es un material no magnético, proporciona una conducción segura para drenar las corrientes provocadas por las descargas atmosféricas (sobretensiones de frente rápido).

Los conectores de compresión dan mayor garantía de buen contacto y son ampliamente utilizados para interconectar la red de tierra, así como para la puesta a tierra de las estructuras metálicas y en general de las partes metálicas expuestas de los equipos eléctricos de la subestación.

Los conectores tipo soldables o exotérmicos, provocan la unión mediante una reacción química entre el conductor y el conector, a base de calor (Cadweld en inglés).

Como accesorios para las diversas conexiones de puesta a tierra, se emplean por lo general conectores grapa de cobre fundido y abrazaderas galvanizadas para la conexión del cable, cintillas flexibles planas de alambre trenzado para los mecanismos de operación manual de cuchillas y las puertas de las cercas, así como conectores rectos para unir dos conductores.

2.29 **Consideraciones para selección**

Todos los conectores empleados en los puntos de unión deben seleccionarse considerando lo siguiente:

- Capacidad de conducción de corriente suficiente para soportar las severas condiciones de magnitud y duración de la corriente de falla.
- Resistencia a la corrosión que retarde su deterioro en el ambiente en el que se instale.
- Conductividad eléctrica que reduzca efectivamente las diferencias de tensión locales de la red de tierra.
- Rigidez mecánica robusta para resistir los esfuerzos electromecánicos que puedan provocar daños físicos a la red.
- Capacidad térmica que permita mantener una temperatura por debajo del conductor y así reducir el efecto del calentamiento.

En todos los casos los conectores deben cumplir con los requerimientos de la norma IEEE std. 837 2002

3. DESARROLLO

3.1 **Recomendaciones prácticas para la medición de Resistividad**

- Las mediciones deben realizarse preferentemente en temporada de sequía, evitando realizarlas después de un día lluvioso o cuando esté lloviendo.
- Utilizar equipo de medición de Resistividad preferentemente digital para evitar errores en la interpretación de lecturas.
- Utilizar cables forrados de calibres No. 12 o 14 A WG, los cuales son requeridos básicamente por su resistencia mecánica y no por sus características eléctricas.
- Utilizar electrodos de dureza suficiente que soporten el uso rudo en terrenos de diferente (arcilla, roca arena, etc.).
- Siempre es recomendable contar con una cinta métrica de 50 metros de longitud, preferentemente de lona, un martillo bola con peso adecuado y un termómetro.
- Como medida de Seguridad se debe usar siempre guantes de carnaza o algún otro aislante cuando se trabaja en instalaciones energizadas, esto por la posibilidad de que se presenten elevaciones de potencial peligrosas cuando se estén haciendo las mediciones debidas a fallas en la instalación.
- No se debe tocar los electrodos de corriente cuando se estén efectuando las mediciones requeridas.
- En el caso de conocer el área para una subestación las mediciones por el método de Wenner deben hacerse en dirección de las diagonales que forman las cuatro esquinas del terreno, iniciando a partir del centro hacia afuera, se debe iniciar con una separación "a" = 3,0 a 5,0 m. dependiendo de la profundidad requerida de los electrodos para dar firmeza a su colocación, se debe dar incrementos en "a" de 2 a 3 metros hasta llegar a una separación máxima de 1/3 de "L" que es la longitud mayor del rectángulo formado por las dimensiones del terreno.

Dado las recomendaciones anteriores se comenzó a destapar los registros para comenzar las mediciones de las varillas enterradas en los registros.

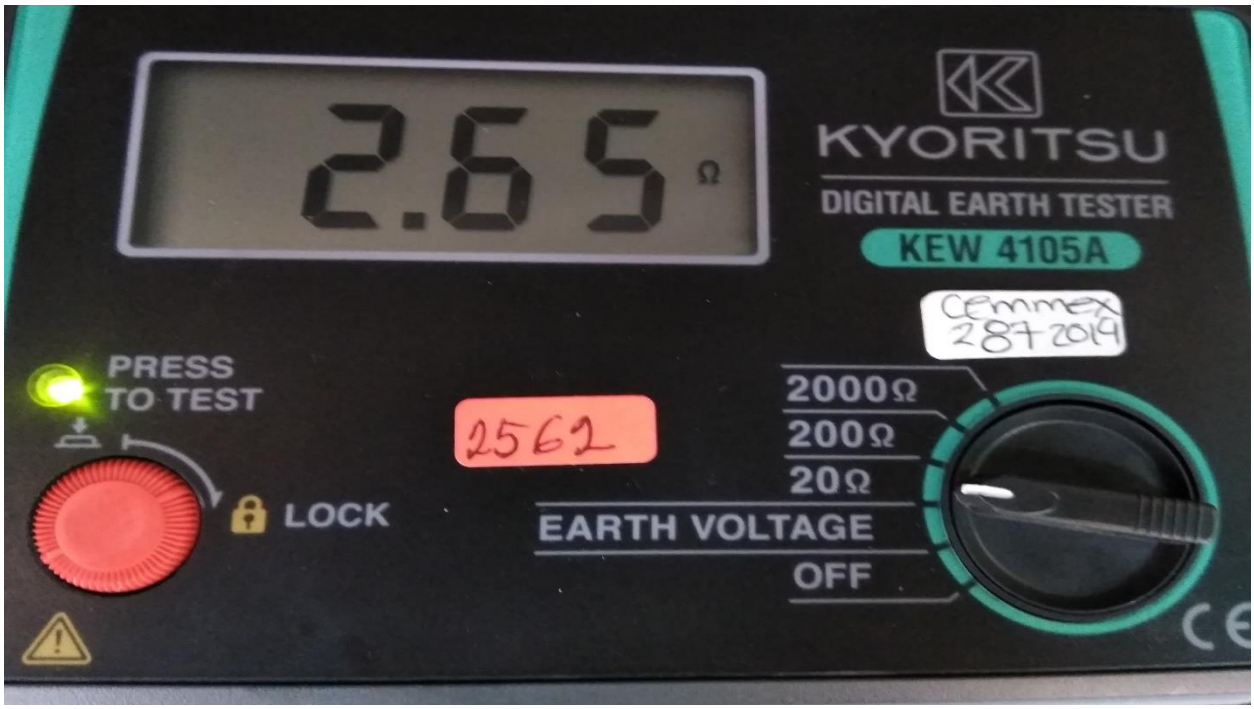
fotografía 1 des tapamiento de registros

Se procedió a destapar los registros y desconectar el cable de puesta a tierra, siguiendo las recomendaciones para obtener buenos resultados.

Fotografía 2 conexión de puntas

fotografía 3 medición del primer registro

Cuando se tomó la primera medición del primer registro pues no cumplía con la resistencia adecuada como lo marca la norma, para que pudiera estar en norma se retiró el exceso de tierra y se rellenó con polvo gem, grava, grafito, etc. Y así con este proceso se obtuvieron mejores resultados.



Fotografía 4 resultado

Si comparamos los resultados de las fotografías 3 y 4 vemos los cambios de resistividad, esto fue al tratamiento químico que se le pudo aplicar para obtener como resultado 2.65 Ω.

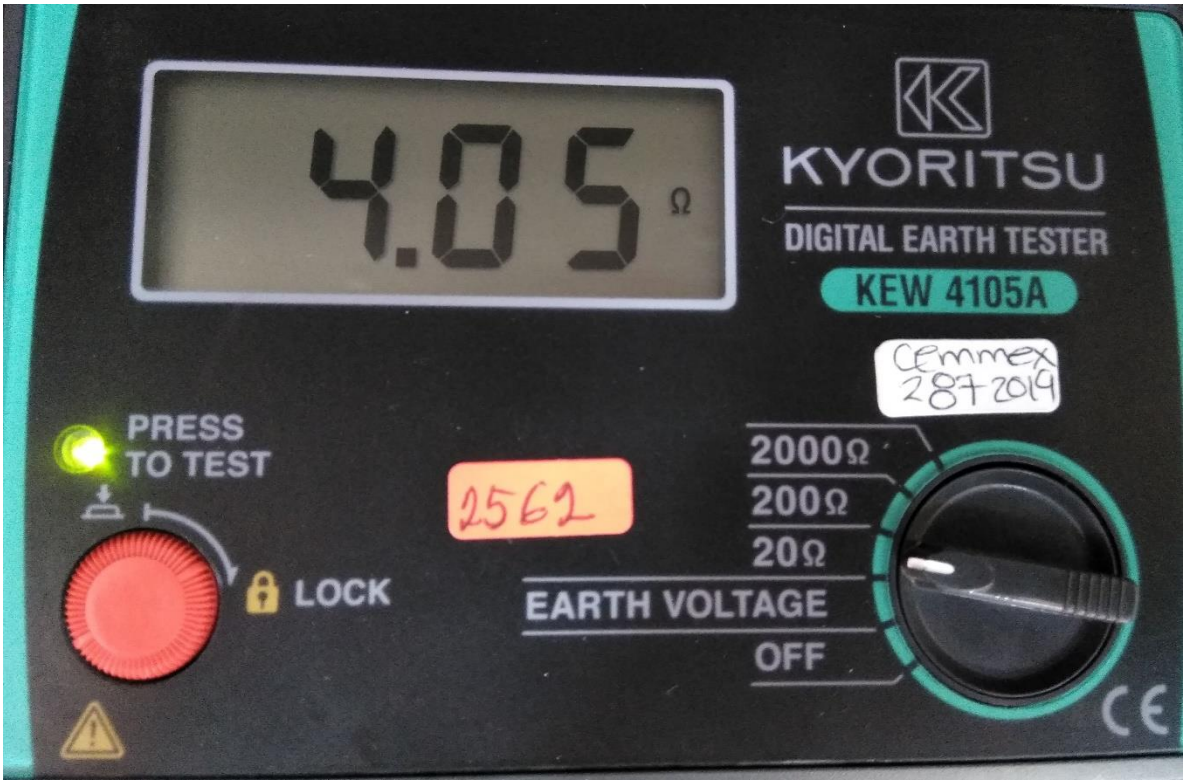
Fotografía 5. Medición segundo registro

En el segundo registro se hizo el mismo procedimiento y aquí observamos que cuenta con la medición que es aceptable que es de 1.95Ω.

Fotografía 6. Destapa miento del tercer registro

Fotografía 7 tercera lectura de medición

en esta medición podemos observar que esta en el rago aceptable pero para corroborar que la medicion es la correcta se volvio hacer la medicion con el equipo de medcion de la empresa celmec, y obtuvimos el siguiente resultado que acontinuacion se muestra.

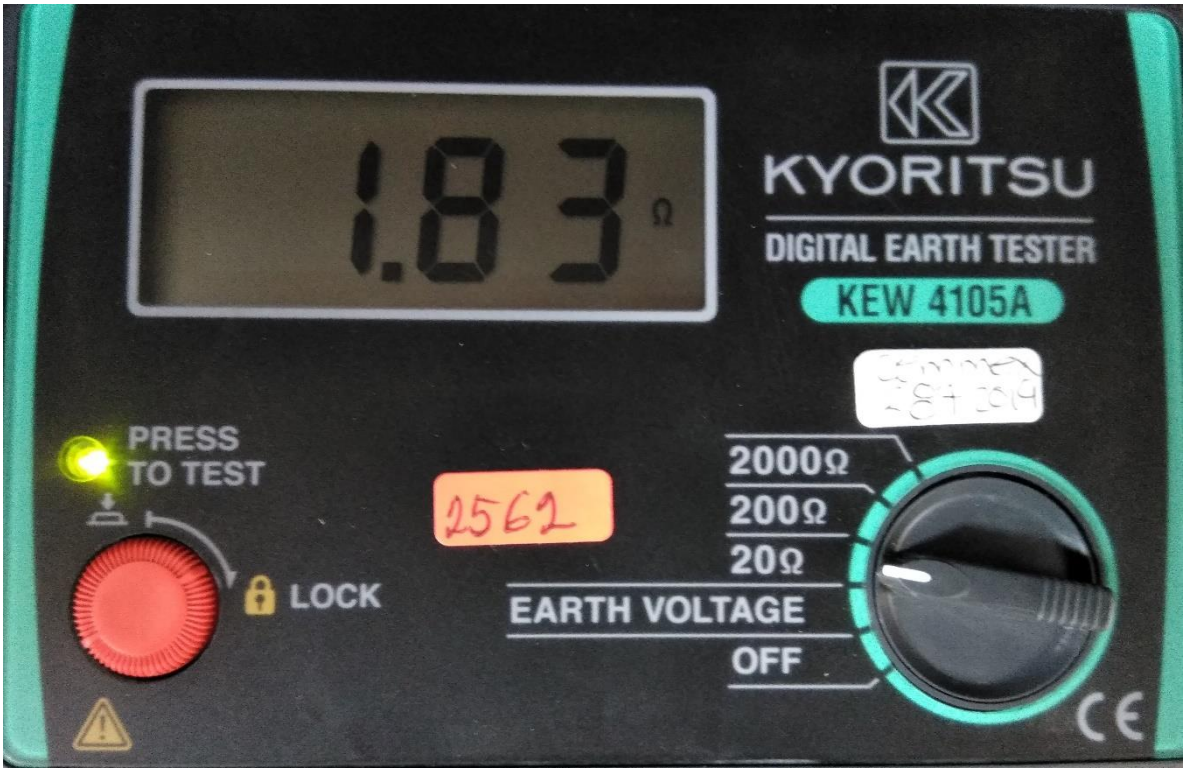


Fotografía 8 tercera medición con equipo celmec

como se observa fueron las mismas mediciones, con esto corroboramos que si esta en rango aceptable, pero se le hicieron algunas recomendaciones para bajar un poco el valor de resistencia sea aun menor.

Fotografía 9 registro 4

En esta medición obtuvimos un resultado de 4Ω lo que indica que esta en el rango de norma, pero como se observa en la fotografía tiene un tratamiento químico, lo cual no convenció al ingeniero y se hizo otra medición con otro equipo.



Fotografía 10 medición del registro 4 corregida

Con esta medición se dio cuenta el ingeniero que el dispositivo anterior tenía batería baja lo cual hizo variar mucho la medición.

Fotografía 11 señalización de cable de tierra aislado

Con esto se concluyó la verificación, se observo que los registros estaban en los lugares adecuados, los registros estaban señalizados se podían distinguir entre registros de tierra y registros de conexiones o de tuberías, en las mediciones que se hicieron pues cumplían con las normas.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

En todo el proceso de ejecución de la obra de proyecto de residencia profesional se fueron adquiriendo aprendizajes, de los cuales son como realizar una verificación de sistemas de tierra, y el resultado más satisfactorio que se adquirió fue el de saber que toda obra tiene los mismos principios, eso nos prepara para poder ejecutar y realizar infinidad de obras de electrificación para el futuro.

Durante la ejecución del proyecto se analizaron diferentes puntos y aspectos, que implican tener un buen desarrollo del proyecto, tales aspectos son la organización, responsabilidad, seriedad y muy importante la disciplina con la persona que tiene a su cargo el control de la obra, de la misma forma la capacidad de comunicación que se debe tener con el personal que labora en la obra.

En el proceso de ejecución de proyecto, cuando se comenzaron hacer las pruebas de medición de puestas a tierra, se obtuvieron resultados fuera de norma de acuerdo a la IEEE Std. 80. Lo que llevo hacer una revisión mas profunda para dar una mayor seguridad a los trabajadores y al público en general.

Para mejorar la resistividad de las varillas de tierra y del suelo se utilizó una mezcla homogénea de polvo gem, grafito, grava etc. Para que la medición estuviera como lo marca la noma NOM-001-SEDE-2012, también de acuerdo a lo que cita la IEEE std. 80. Y así poder cumplir con seguridad y estar en lo que la normas indican.

Teniendo el material adecuado y los recursos necesarios para llevar acabo la verificación, se pudo obtener resultados y en base a eso se pudo hacer correcciones y mejoramiento para que todo estuviera en orden y en norma que es lo mas importante.

Las evidencias y resultados presentados en este proyecto fueron de mediciones de sistemas de puesta a tierra en gasolineras, el cual tuvo como objetivo verificar los sistemas de tierra en gasolineras, ya que hoy en día, es algo indispensable para la seguridad de la misma.

Gracias a que la empresa CELMEC, DISEÑO Y CONSTRUCCION, S.A. DE C.V. me brindó la oportunidad de desarrollar la residencia procesional ahí, logre desenvolver y adquirir conocimientos durante mi formación, así también aprender y conocer del personal que labora en la obra y en la empresa, fue de gran ayuda e impulso para estar preparado para la vida tanto personal como laboral.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

"PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS ELECTRICOS". (2012). *ENERGY MANAGEMENT*.

calculo de sistemas de puesta a tierra. (s.f.). Obtenido de Dialnet-CALCULODELAMALLADEPUESTAATIERRADEUNASUBESTACION-4846270.pdf

CFE. (2006). *glosario de cfe.* Obtenido de https://app.cfe.mx/informe2006/archivos/cont_114.html

CFE. (2015). Obtenido de red de puesta a tierra: https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/d/00J00-52.pdf

DIAZ, P. (2011). *"SOLUCIONES PRACTICAS PARA LA PUESTA A TIERRA DE SISTEMAS ELECTRICOS".* Editorial Mc Graw Hill.

equipo y material de sistemas de puesta a tierra. (s.f.). Obtenido de https://alianzaelectrica.com/conectores.php

GARCIA MARQUE, R. (2010). *"LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELECTRICAS".* editorial alfa y omega.

Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York. (2012). *IEEE Std 81-2012* .

INGESCO. (2018). Obtenido de https://www.ingesco.com/es/productos/puesta-tierra

JHON ASDRÚAL HERRERA, O. C. (OCTUBRE de 2003). *"CALCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA".*

LA PUESTA A TIERRA. (SEPTIEMBRE de 2014). EDITORA MICROBYTE Ltda.

NOM-001-SEDE-2012, N. O. (2012). INSTALACIOES ELECTRICAS (UTILIZCIÓN).

NORMA ANSI/IEEE Std 80. (200).

NRF-001-CFE-2004. (s.f.). "SISTEMAS DE PUESTA A TIERA PARA PLANTAS Y SUBESTACIONES ELECTRICAS".

PUESTA A TIERRA. (s.f.). Obtenido de https://www.areatecnologia.com/electricidad/puesta-a-tierra.html

puesta a tierra NOM-001-sede-2012. (29 de noviembre de 2018). Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5280609&fecha=29/11/2012

REGLAMENTO TÉCNICOPARA INSTALACIONES ELECTRICAS "RETIRE". (13 de MAYO de 2012). Obtenido de http://minminas.gov.co

ROJAS, G. (s.f.). *MANUAL DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.* Obtenido de https://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf

sistema de puesta a tierra. (s.f.). Obtenido de https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe80.html

6. ANEXOS

INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RClamp

DATOS DEL SITIO
Fecha:_____
Subestación:_____Planta:_____ Otro:_____
Dirección:_____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)
Tipo de electrodo de prueba:_____ Número de electrodos PAT:_____
Longitud del electrodo:_____ (m) Diámetro del electrodo:_____(in)

DATOS COMPLEMENTARIOS
Responsable:_____ Método de medición: CLAMP-ON
Equipo para prueba:_____ Fecha de calibración:_____
Condiciones del suelo: Seco ☐ Húmedo ☐
Observaciones:_____

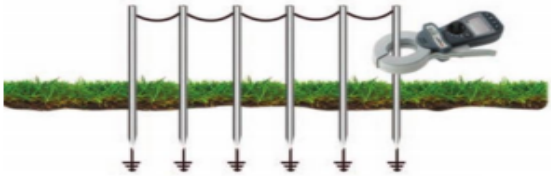
Anexo 1 informe de resistencia de puesta a tierra con amperímetro de gancho

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Descripción de los puntos de prueba	Valor medido de corriente (A)	Valor medido de R (Ω)
Punto 1		
Punto 2		
Punto 3		
Punto 4		
Punto 5		
Punto 6		
Punto 7		
Punto 8		
Punto 9		
Punto 10		

Notas:

- En su mayoría, este método se utiliza para medición de resistencia de PAT de electrodos en paralelo.
- El sistema de tierra puede estar conectado.
- De necesitar realizar más mediciones, añadir a la tabla las filas que considere necesarias.
- Dependiendo del equipo de medición, el valor de la corriente puede ser leída directamente con la resistencia o deberá cambiarse de función (Consultar con manual del fabricante)
-Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.



Anexo 2 registro de medición con amperímetro de gancho

INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RFOP

DATOS DEL SITIO
Fecha:_____
Subestación:_____Planta:_____ Otro:_____
Dirección:_____

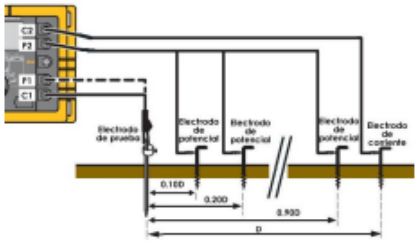
DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)
Tipo de electrodo de prueba:_____ Número de electrodos PAT:_____
Medida de la malla:_____x_____(m^2) Longitud más grande de la malla:_____ (m)
Longitud del electrodo:_____ (m) Diámetro del electrodo:_____(in)

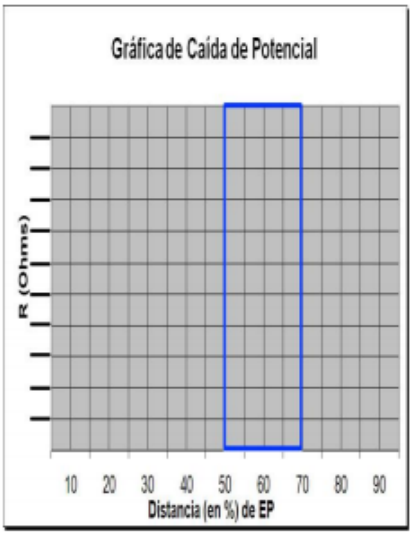
DATOS COMPLEMENTARIOS
Responsable:_____ Método de medición: FOP COMPLETO
Equipo para prueba:_____ Fecha de calibración:_____
Condiciones del suelo: Seco ☐ Húmedo ☐ Frecuencia de prueba:_____
Distancia del electrodo de corriente al electrodo de prueba:_____ (m)
Observaciones:_____
Calculo de Resistencia Efectiva de tierra: $R = (R_{50\%} + R_{60\%} + R_{70\%})/3$ (Ω)

Anexo 3 formato de campo por el método completo

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial (m)	Valor medido de R (Ω)
10%		
20%		
30%		
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		
Resistencia efectiva		(Ω)





Notas:
- El sistema de puesta a tierra debe estar desconectado.
- La distancia entre electrodos deberá ser 5 veces la mayor longitud de la malla.
- Dependiendo del equipo de medición, la terminal de corriente 1 deberá estar conectada de manera externa a la terminal de potencial 1 con un cable corto. (Consultar en el manual del fabricante)
- La resistencia efectiva será la contemplada entre el 50% y 70% de la distancia del electrodo de potencial, ya que es la zona más constante de la gráfica.

Anexo 4 registro de mediciones

INFORME DE CAMPO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

RPDT

DATOS DEL SITIO

Fecha:_____

Subestación:_____Planta:_____ Otro:_____

Dirección:_____

DATOS DE DISEÑO (Si se cuenta con ellos)

Tipo de electrodo de prueba:_____ Número de electrodos PAT:_____

Medida de la malla:_____x_____(m^2) Longitud más grande de la malla:_____ (m)

Longitud del electrodo:_____ (m) Diámetro del electrodo:_____(in)

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable:_____ Método de medición: PENDIENTE

Equipo para prueba:_____ Fecha de calibración:_____

Condiciones del suelo: Seco ☐ Húmedo ☐ Frecuencia de prueba:_____

Distancia del electrodo de prueba a electrodo de corriente *CP*:_____ (m)

Cálculo de coeficiente de la pendiente $\mu = (R3 - R2)/(R2 - R1)$

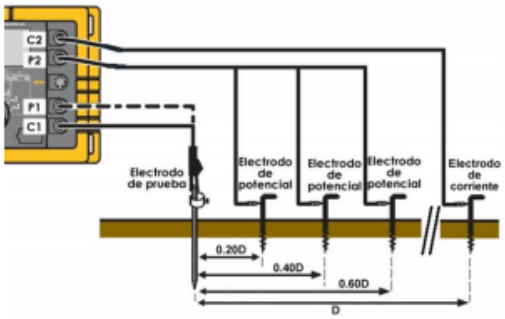
Observaciones:_____

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

Medición #	Porcentaje de distancia de electrodo de potencial	Distancia a electrodo de potencial *PPt* (m)	Valor medido de R (Ω)	Coeficiente de la pendiente μ	Parámetros de tablas y cálculos
1	20%		R1=	μ=	PPt/CP=
2	40%		R2=		PPt= $\frac{PPt/CP}{CP}$ =
3	60%		R3=		
Valor de R colocando el electrodo de potencial a una distancia PPt =					(Ω)

Notas:

- El sistema de puesta a tierra debe estar desconectado.
- Deberá disponerse el equipo como en el método de caída de potencial.
- La distancia entre el electrodo de prueba y el de corriente *D* deberá ser de 5 veces la mayor longitud de la malla.
- Dependiendo del equipo de medición, la terminal de corriente 1 deberá estar conectada de manera externa a la terminal de potencial 1 con un cable corto. (Consultar en el manual del fabricante)
-Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.



Anexo 5 formato de campo con el método pendiente