
APUNTE de CÁTEDRA:

Tema: PUESTA A TIERRA

1 Contenido:

1	Contenido:	1
2	Objetivos.	2
3	Introducción.....	2
3.1	Definición de puesta a tierra:	2
3.2	Importancia de la Puesta a Tierra:.....	2
3.2.1	El sistema TT:.....	2
3.2.2	El Sistema TN:	3
3.2.3	El Sistema IT:.....	3
3.2.4	Funcionamiento del conjunto Puesta a Tierra – Interruptor Diferencial.	4
3.3	Diferencia entre Resistencia de una Puesta a Tierra y Resistividad de Suelo	8
3.4	Resistividad de Suelo – Descripción.	10
3.5	Resistencia de Puesta a Tierra – Descripción	12
4	Teoría de la Resistencia de Puesta a Tierra en un Electrodo Simple.....	13
5	Teoría de la Medición de Puesta a Tierra:.....	16
6	Teoría de la Medición de la Resistividad de los Suelos.....	19
7	Métodos Prácticos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra	20
7.1	Método de los dos Puntos o dos Polos	21
7.2	Método de los tres Puntos.....	23
7.3	Método de Caída de Potencial	24
8	Método Práctico de Medición de la Resistividad de Suelo	25
9	Aspectos Prácticos de una Puesta a Tierra.	26
9.1	Valores de Resistencia Recomendados	26
9.2	Formas Constructivas de una Puesta a Tierra	26
9.3	Variación de la Resistencia según el Área de los Conductores	29
10	Consideraciones Finales	30
11	Resumen de Pasos a Seguir para la Medición de la Resistencia de un Electrodo	31

2 Objetivos.

- Plantear nociones básicas sobre la función de una puesta a tierra.
- Identificar claramente los conceptos puesta a tierra y resistividad de terrero.
- Comprender las técnicas de medición de puestas a tierra.
- Comprender las técnicas de medición de la resistividad de terreno.

3 Introducción.

3.1 Definición de puesta a tierra:

Las redes eléctricas de baja tensión se diferencian según:

- El tipo de corriente: alterna (AC), o continua (DC).
- El tipo y número de conductores activos del sistema: trifásica (L1, L2, L3, N) o monofásica (L, N).
- El sistema de **puesta a tierra** de la red.

*En general se denomina **puesta a tierra** a cualquier ligazón o enlace metálico, directa, sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación eléctrica y un electrodo o un grupo de electrodos enterrados en el suelo, con objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno, no existan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de defecto o las corrientes debida a descargas atmosféricas.*

Es decir que las puestas a tierra tienen una doble misión:

- **Una Función Estática.**

La función estática de una puesta a tierra es fijar un potencial invariable en los aparatos eléctricos o electrónicos y masas conductoras. Por ejemplo, en la industria en el caso de máquinas, computadoras o partes de instalaciones que pueden acumular cargas electrostáticas.

- **Una Función Dinámica.**

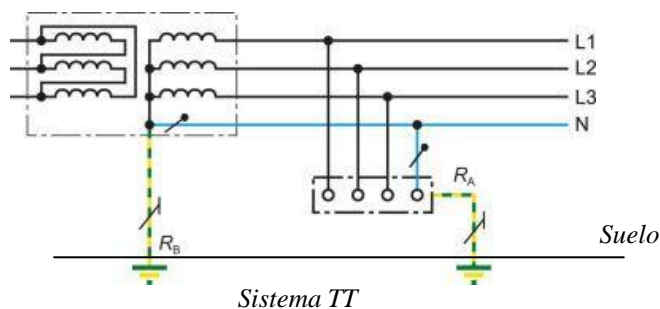
La función dinámica de una puesta a tierra es dirigir a tierra las corrientes de defecto, de naturaleza e intensidad diversas que, en algunos casos, pueden llegar a intensidades muy elevadas. También se incluye dentro de esta función dirigir a tierra corrientes provenientes de descargas atmosféricas (rayos).

3.2 Importancia de la Puesta a Tierra:

Para fijar un potencial invariable (función estática) o para dirigir a tierra las corrientes de defecto (función dinámica) se pueden utilizar distintos sistemas de puesta a tierra: los más comunes son los sistemas “TT”, “TN” e “IT”.

3.2.1 El sistema TT:

En los sistemas TT existe un punto puesto a tierra directamente (puesta a tierra de servicio) o “R_S”. Las masas de la instalación eléctrica están conectadas a tomas de tierra independientes eléctricamente “R_A” de la toma de tierra de servicio para la puesta a tierra del sistema.

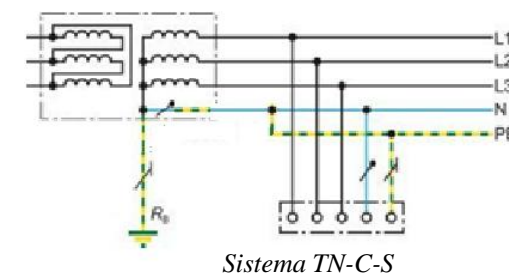
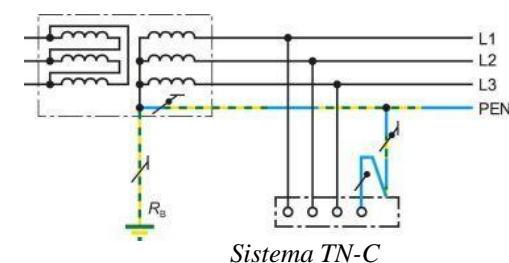
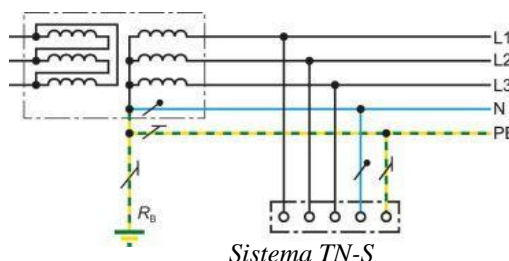


3.2.2 El Sistema TN:

En los sistemas TN existe un punto puesto a tierra directamente y las masas de la instalación eléctrica están conectadas a este punto mediante conductores de protección.

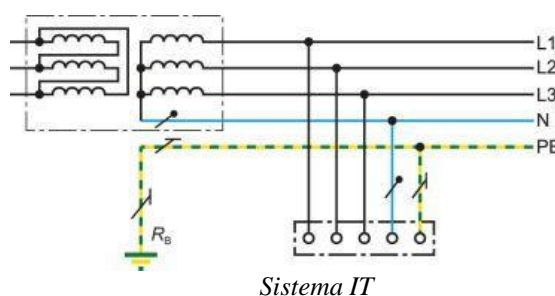
Podemos diferenciar tres tipos de sistemas TN en función de la asignación del conductor neutro y el conductor de protección:

- TN-S: Se utiliza un conductor de protección separado en todo el sistema (conductor PE).
- TN-C: Las funciones del conductor neutro y del conductor de protección están combinadas en un único conductor en todo el sistema.
- TN-C-S: En una parte del sistema, las funciones del conductor neutro y del conductor de protección están combinadas en un único conductor.



3.2.3 El Sistema IT:

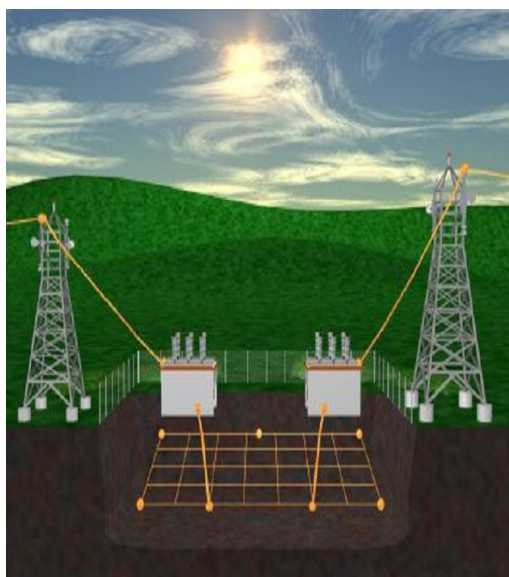
En los sistemas IT, todos los conductores activos están separados de tierra. Esto hace que, en caso de fallo de aislamiento, solo pueda circular una corriente de fallo pequeña, originada principalmente por la capacidad de derivación de la red. Los fusibles conectados en serie no se disparan. Asimismo, se conserva el suministro de corriente incluso en caso de contacto a tierra unipolar y directo.



La elección del sistema de puesta a tierra adecuado es fundamental, ya que determina el comportamiento y las propiedades de la red e influye en aspectos de su utilización como los siguientes:

- Seguridad del suministro o disponibilidad de la energía eléctrica.
- Complejidad de la instalación.
- Mantenimiento, tiempos de inactividad.
- Compatibilidad electromagnética.

Como se dijo, las puestas a tierra también tienen la función dinámica de dirigir a tierra las corrientes producidas por rayos sobre estructuras, líneas de transporte y distribución de energía eléctrica como se muestra en las siguientes figuras:



3.2.4 Funcionamiento del conjunto Puesta a Tierra – Interruptor Diferencial.

Para diseñar los sistemas de protección puesta a tierra se toman en cuenta los efectos producidos por la circulación de corriente a través del cuerpo humano. Estos efectos son:

1. **Calentamiento (quemadura)**

Se producen por la circulación de corrientes muy elevadas, generalmente en los puntos de mayor resistencia, esto es en los puntos de contacto. En ocasiones es causa de la pérdida de dedos o miembros. Generalmente estas consecuencias se tienen en media tensión por contactos directos, ya que en baja tensión las intensidades no llegan a ser tan altas. También pueden provocarse serias quemaduras por efectos del arco, aunque la corriente no circule por el individuo.

2. **Contracciones musculares.**

Es la contracción involuntaria de los músculos, provocando que el individuo quede asido al elemento que lo electrocuta, o salga violentamente despedido por acción de la contracción muscular.

3. **Tetanización muscular**

Cuando la contracción muscular llega a afectar a los músculos de la caja torácica, se ve impedida la respiración al no poder expandirse los pulmones. Esta situación es denominada asfixia por tetanización, que de prolongarse provoca el paro respiratorio, que es la suspensión del reflejo respiratorio, vale decir que el accidentado seguirá sin respirar aún después que ha sido desacoplado del circuito.

4. **Paralización cardíaca (por fibrilación)**

Es el temblor del músculo cardíaco como consecuencia de la acción independiente y no coordinada de sus fibras, que se contraen y relajan desordenadamente. En este estado el corazón deja de cumplir su función de bomba sanguínea.

Los efectos son proporcionales a la cantidad de electricidad que circula a través del cuerpo y a la duración de esta corriente de descarga.

Para corriente alterna de frecuencia industrial (50-60 Hz), forma de onda sinusoidal, tiempo de circulación elevado (**más de 10 seg.**), trayecto de circulación mano-mano o mano-pié, y contextura física de un individuo adulto (peso mayor a 50 Kg.) se tiene:

- **1 a 3 mA Umbral de percepción:**
es la corriente mínima necesaria para advertir que está circulando corriente por el cuerpo. No representa ningún peligro.

La norma IRAM 2371/83 lo fija en 0,5 mA. Esta puede considerarse como la máxima corriente de fuga que podrá tener la aislación de elementos no puestos a tierra. Por ejemplo: una pértiga de maniobra.
- **10 a 15 mA Umbral de desprendimiento:**
Es el valor máximo de corriente a la cual alguna persona agarrada a electrodos puede desprenderse de ellos. La norma IRAM 2371/83 lo fija en 10 mA.
- **15 a 30 mA Umbral de asfixia por tetanización:**
es la corriente mínima necesaria para que la tetanización se extienda a los músculos de la caja torácica.
- **30 mA Umbral de fibrilación:**
es la corriente mínima necesaria para provocar la fibrilación cardíaca en el 0,5 % de los individuos.

Curvas de corriente - tiempo

Al considerar los umbrales de intensidad del punto anterior, se dijo que el tiempo era suficientemente grande (más de 10 seg). Pero también podemos considerarlo variable, y nos encontramos así que para un mismo efecto, si los tiempos de circulación son menores, pueden admitirse corrientes más elevadas.

En la bibliografía pueden encontrarse curvas de efectos tiempo / corriente como la que se muestra a continuación. En esta curva se muestra el efecto de la corriente sobre las personas (15 a 100 Hz.) donde se distinguen varias zonas.

Zonas	Efectos Fisiológicos.
Zona I	Normalmente sin reacción
Zona II	Usualmente sin efectos fisiológicos.
Zona III	Usualmente no se esperan daños orgánicos. Aparecen contracciones musculares y dificultad en la respiración, disturbios reversibles de impulsos en el corazón. Paros cardiacos transitorios sin fibrilación ventricular se incrementan con la corriente y el tiempo.
Zona IV	En adición a los efectos de la Zona III, la probabilidad de fibrilación ventricular se incrementa hasta un 5% sobre (curva C2), y hasta un 50% (curva C3), y arriba de un 50% por encima de la curva C3. Los efectos de paros cardiacos, respiratorios y quemaduras pueden ocurrir con el incremento de la corriente y el tiempo.

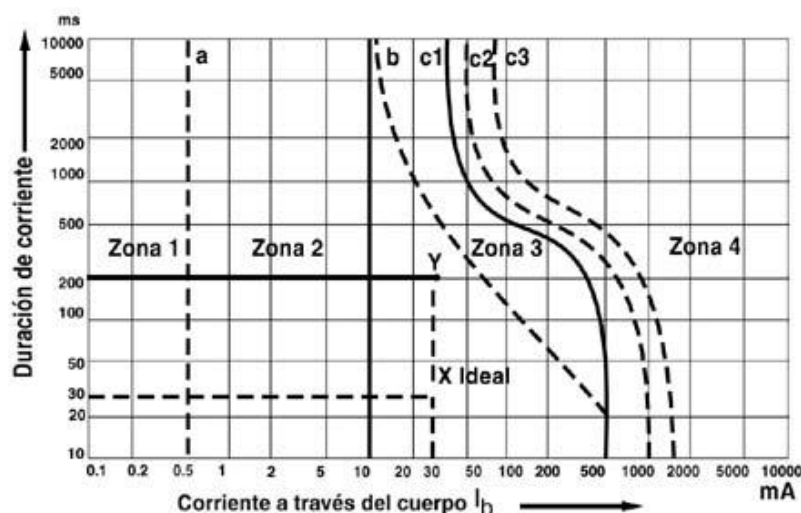


Figura 1: curvas corriente-tiempo

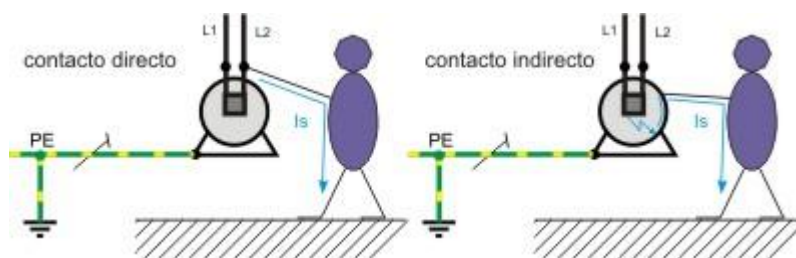
Note que el punto X es el punto de accionamiento de los Interruptores Automáticos de Corriente Diferencial 30mA de uso domiciliario. Este actúa en la Zona 2, donde no se espera que existan efectos fisiológicos.

Contacto directo y contacto indirecto

Diferenciaremos dos clases de contacto: directo e indirecto.

Contacto directo: es aquel que se establece entre un individuo y un elemento que habitualmente está tensionado. Cables, barras, etc.

Contacto indirecto: es aquel que se establece entre un individuo y un elemento que no está habitualmente tensionado, pero que puede estarlo por un defecto de su aislamiento. Ejemplo: carcasa de un motor, cuba de un transformador, palanca de mando de un seccionador, heladera, lavarropa, etc. Su peligrosidad está en que los usuarios se acercan a las masas sin sospechar de su eventual energización.



Protección de las personas contra contactos directos

Teniendo en cuenta que un contacto directo ocurre cuando una persona toca directamente elementos energizados se recomienda:

- Recubrir las partes activas con materiales aislantes.
- **TRABAJAR SIN TENSION:** Cuando se realiza un mantenimiento de una instalación eléctrica o de una máquina eléctrica se recomienda trabajar con todas las fuentes desenergizadas para evitar posibles contactos directos con partes energizadas. Cuando esto no es posible usar guantes aislados, protección ocular, herramientas aisladas, etc.

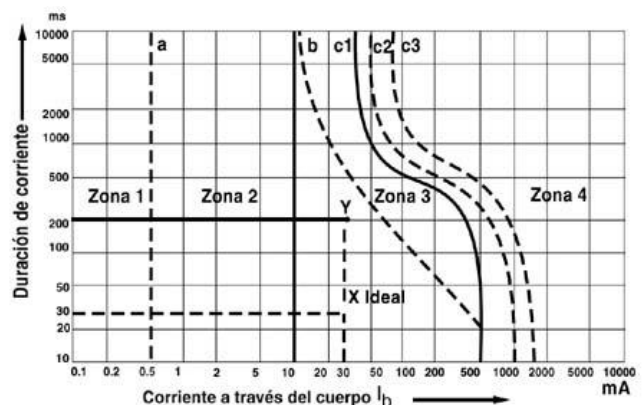


- **DESCARGAR CONDENSADORES DE ALTA CAPACIDAD:** Cuando en los circuitos eléctricos existen condensadores de alta capacidad, se deben descargar a través de una resistencia pequeña, antes de realizar el mantenimiento en dicha instalación.

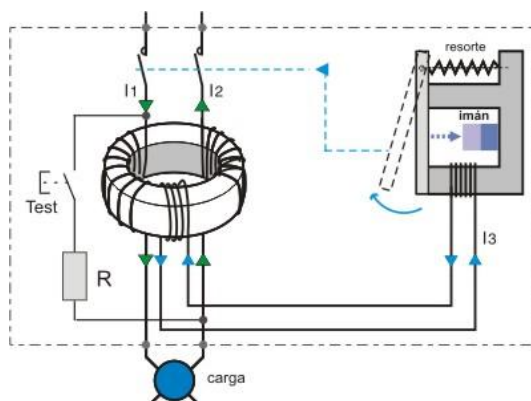
Las redes eléctricas de media y alta tensión son conductores paralelos separados por un material aislante como es el aire, teniendo un comportamiento capacitivo, es decir, una red eléctrica de alta tensión se comporta como un condensador de alta capacidad. Por tal motivo se debe tener muchísimo cuidado cuando se realiza un trabajo en estas redes eléctricas, antes de comenzar a trabajar en estas redes se deben conectar los conductores a tierra y en cortocircuito.

Protección de las personas contra los contactos indirectos

El relé diferencial de alta sensibilidad, junto con un sistema de tierra TT constituye una excelente protección para la vida humana gracias a su pequeña corriente de disparo (30 mA que es inferior al umbral de fibrilación en tiempos largos), y a su gran velocidad de actuación. Sirve para contactos indirectos.



La siguiente figura muestra el diagrama interno descriptivo de un interruptor o relé diferencial general de uso domiciliario. El interruptor diferencial, a través de dos bobinas arrolladas sobre un toriode, evalúa constantemente la suma vectorial de la corriente que circula a través de la fase y neutro. En condiciones normales, ambas corrientes son iguales y cada una de ellas genera flujos magnéticos sobre el toroide que se oponen, y entonces la suma de vectorial de ellos es cero. En estas condiciones no habrá flujo neto atravesando la tercer bobina ($I_3 = 0$) y por lo tanto los contactos principales estarán cerrados.



En caso de un defecto a tierra (corriente de fuga), la suma vectorial de I_1 e I_2 deja de valer cero, en cuyo caso aparecerá un flujo neto en el toroide y se inducirá en la tercer bobina una corriente (I_3). La corriente I_3 acciona un electroimán que vencerá el mecanismo interno (la fuerza de atracción ejercida por el imán) y de este modo provocará la apertura de los contactos principales desconectando el circuito.

Para que la protección diferencial sea efectiva como protección contra contacto indirecto, es imprescindible que la carcasa de todo aparato de consumo esté **conectada a tierra**. Esto se consigue con la utilización del llamado “Conductor de Protección” o “Conductor de Tierra” o “PE”.

El conductor de tierra PE debe llegar a cada tomacorriente, y a la carcasa de todo equipo eléctrico y conectarse a tierra mediante la llamada “puesta a tierra”.



La combinación disyuntor – conductor PE y puesta a tierra resulta ideal en un sistema TT, ya que cuando ocurre una falla de aislamiento en una instalación la puesta a tierra canalizará la corriente de falla haciendo que actúe el disyuntor diferencial antes que se produzca el contacto indirecto, de allí la importancia de su uso.

En resumen: El objetivo de un sistema de puesta a tierra es:

- a) Brindar seguridad a las personas.*
- b) Proteger las instalaciones equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección. ,*
- c) Establecer la permanencia, de "un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.*
- d) Mejorar calidad del servicio*
- e) Disipar la corriente asociada a descargas atmosféricas y limitar las sobre tensiones generadas.*
- f) Dispersar las cargas estáticas a tierra*

3.3 Diferencia entre Resistencia de una Puesta a Tierra y Resistividad de Suelo

Existen dos parámetros importantes a la hora de diseñar o realizar mantenimiento de un sistema de puesta a tierra:

- 1- Resistencia del sistema de puesta a tierra (electrodo, malla, etc)
- 2- Resistividad del suelo.

Aún cuando pudiesen confundirse estos dos términos, tienen significados diferentes. La eficiencia de un sistema de un electrodo enterrado (barra, jabalina, . malla, plato, etc) es evaluado en términos de resistencia. La resistencia de una puesta a tierra es una medida de cuán bien el electrodo puede dispersar corriente en el suelo circundante. Al hacer una medición de resistencia, se está probando un sistema particular de tierra.

La resistencia del sistema de puesta a tierra es medida en Ω .

La medición de la resistencia o impedancia de puesta a tierra así como los gradientes de potencial en la superficie de la tierra debido a corrientes de tierra, es necesaria por diferentes razones, entre ellas:

- Determinar la resistencia actual de las conexiones a tierra.
- Verificar la necesidad de un nuevo sistema de Puesta a Tierra.
- Determinar los valores de voltajes de paso y toque y su posible aumento que resulta de una corriente de falla en el sistema.
- Diseñar protecciones para el personal y los circuitos de potencia 'Y' comunicación.

Las propiedades eléctricas del suelo son descritas en términos de resistividad. Al hacer una medición de resistividad se está haciendo una prueba al propio suelo.

La resistividad de suelo o terreno es dada comúnmente en Ωm.
--

La resistividad de un suelo determinado combinado con la configuración del electrodo conforma la resistencia que dicho electrodo en particular experimenta. En la práctica, la medición de resistividad es realizada primero, para identificar un buen sitio para la puesta a tierra y hacer el cálculo teórico para su diseño óptimo. Después se realiza la medición de resistencia para verificar que se ha logrado el valor deseado según los requerimientos.

La medición de resistividad es útil para los siguientes propósitos:

- Estimación de la resistencia de Puesta a Tierra de una estructura o un sistema
- Estimación de gradientes de potencial incluyendo voltajes de toque y paso
- Cálculo del acoplamiento inductivo entre circuitos de potencia y comunicación cercanos
- Diseño de sistemas de protección catódica

La resistividad del suelo varía por muchas razones: entre ellas la profundidad desde la superficie, el tipo y la concentración de químicos en el suelo, el contenido de humedad y la temperatura.

En otras palabras, la resistividad del suelo es aquella que posee el electrolito contenido en el mismo. La presencia de agua en la superficie, por ejemplo, no indica necesariamente una resistividad baja.

Debido a que la resistividad del suelo varía notablemente por el tipo de suelo, así como por las condiciones climáticas, el sistema de puesta a tierra debe ser diseñado para el peor caso posible. Las características del suelo y el contenido de agua son más estables en estratos más profundos, de allí que se recomienda que los electrodos sean instalados lo más profundo posible en la tierra, alcanzando los estratos más húmedos. Asimismo, deben ser instalados donde la temperatura es más estable.

Se debe tener en cuenta que el suelo con baja resistividad es normalmente más corrosivo debido a la presencia de sales y agua. Por ello puede destruir los electrodos y sus conexiones. De allí que se recomienda realizar una inspección anual al sistema de puesta a tierra y medir su resistencia. Aunque ésta variará dependiendo de la época o estación del año, un aumento >20% de la resistencia de tierra debe ser investigado y tomar las medidas correctivas para bajar el valor de la misma.

3.4 Resistividad de Suelo – Descripción.

La resistividad o resistencia específica del terreno se expresa como la resistencia entre dos caras opuestas de un cubo de tierra de 1 m de arista es decir de 1 m³ de volumen (Figura 2).

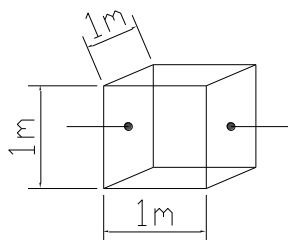


Figura 2

De acuerdo con esta definición representa la resistencia de un conductor de tierra de 1 m² de sección por 1 m de longitud, es decir:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \rightarrow \quad \rho = \frac{R S}{l} = \frac{\Omega \text{ m}^2}{\text{m}} = \Omega \text{ m}$$

Es decir que la resistencia específica del terreno “ ρ ”, puede expresarse en ohmios por metro.

De una manera general sucede que el terreno aún el más favorable puede considerarse como un mal conductor de la electricidad, por esta razón, para la derivación de las corrientes de defecto a tierra es necesario establecer contacto con un electrodo de toma de tierra de gran superficie.

La mayor parte de los componentes que constituyen el terreno (óxido de aluminio, carbonato cálcico, sílice, etc.) tienen, en estado seco, resistencias específicas muy elevadas, muy próximas a la de los materiales aislantes. Pero esta resistencia específica disminuye muy rápidamente con el contenido de sales metálicas disueltas y con el grado de humedad del terreno.

Por otra parte la composición del terreno no es uniforme sino que varía por capas sucesivas, de características muy diferentes, lo que produce un gran margen de incertidumbre cuando se trata de medir la resistencia de una toma de tierra. En la figura siguiente se muestra una sección típica de terreno en la que se instalan las tomas de tierra en cualquier ciudad; puede apreciarse la gran heterogeneidad del cuerpo conductor a través del que circulan las corrientes de tierra.

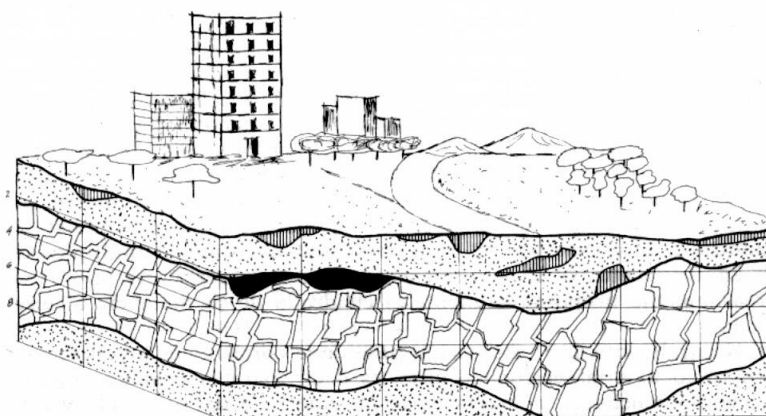


Figura 3

En medio urbano se añaden otras circunstancias: la presencia de numerosos elementos conductores enterrados sobre todo las canalizaciones de todas clases (de agua, de gas, eléctricas, etc.) que ofrecen un paso especialmente favorable a las corrientes de tierra o actuando en sentido contrario, provocar tensiones indeseables en los electrodos de tierra.

Resumiendo, se puede decir que la resistencia específica del terreno está especialmente afectada por los siguientes factores:

a) **La composición del terreno**

b) **La concentración de sales metálicas disueltas.** Como los principales componentes del terreno son aislantes, la conducción de la corriente, se realiza principalmente a través del electrolito formado por las sales metálicas y el agua, normalmente contenidas en el terreno.

c) **El contenido de humedad.** Este contenido no es constante en el terreno ya que varía con el clima, la estación del año, naturaleza del subsuelo, etc. Rara vez el terreno está totalmente seco y su humedad aumenta con la profundidad. La resistencia eléctrica del terreno disminuye si aumenta el contenido de humedad.

d) **La temperatura.** Puesto que la resistividad depende, en gran parte del contenido de agua del terreno y el agua tiene un elevado coeficiente de temperatura, se puede deducir que la resistencia específica del terreno aumenta a medida que disminuye la temperatura. En el caso en que el agua del terreno se hiele, la resistividad del terreno aumenta bruscamente en las proximidades de 0°C.

Por las consideraciones expuestas se puede deducir fácilmente que la resistividad de terreno es una magnitud muy variable y que depende de muchos factores aleatorios. Para conocer su valor, el único sistema aceptable es la medición directa y obtenerlo de esta forma en las condiciones presentes en cada caso.

No obstante, en las siguientes tablas se expresan valores típicos de algunos materiales y terrenos.

Naturaleza del Terreno	Resistividad [Ω m]
Terreno pantanoso	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceo	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Caliza agrietada	500 a 1000
Pizarra	50 a 300

Tabla 1: Tabla de resistividad de algunos materiales

Naturaleza del Terreno	Valor Medio de la Resistividad [Ω m]
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

Tabla 2: Tabla de resistividad de algunos suelos

3.5 Resistencia de Puesta a Tierra – Descripción

La resistencia de puesta a tierra de un electrodo está compuesta de tres factores:

- La resistencia del propio electrodo (la del metal) .
- La resistencia de contacto del electrodo con el suelo.
- La resistencia del suelo, desde la superficie del electrodo hacia afuera, en el espacio por donde circula la corriente, tierra circundante, desde el electrodo hacia el infinito.

En Figura 4 se muestra un electrodo simple con su esfera de influencia

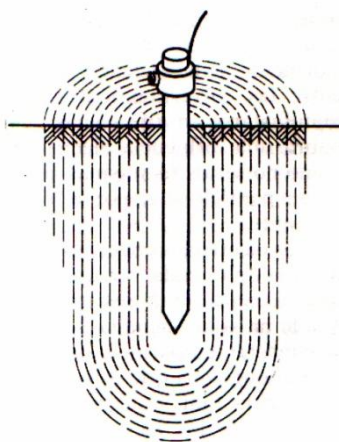


Figura 4: Esfera de influencia de un electrodo simple

La resistencia del electrodo y su conexión es muy baja ya que los electrodos son hechos de un material bastante conductor y bajo en resistencia, como el cobre. La resistencia de contacto del electrodo con la tierra es también bastante baja si, el electrodo está libre de pintura, grasa, etc, y el electrodo está firmemente enterrado. En cuanto a la resistencia con la tierra circundante se tiene que ésta es la que tiene mayor valor de las tres.

El electrodo es rodeado por conos concéntricos de un mismo espesor (como se observa en la Figura 4). Los conos más cercanos al electrodo tienen menor área y por tanto mayor resistencia. Cada cono subsecuente posee mayor área y contribuye con menor resistencia.

Finalmente hay un punto donde la suma de los conos más lejanos no implica un aumento apreciable en la resistencia total del electrodo de tierra.

4 Teoría de la Resistencia de Puesta a Tierra en un Electrodo Simple

La teoría que desarrollamos a continuación se basa en las siguientes hipótesis:

- El suelo es homogéneo e isotrópico y su resistividad eléctrica es ρ [$\Omega \cdot m$] constante.
- Las líneas de corriente que salen del electrodo (que es la primera superficie equipotencial) se dispersan alrededor del electrodo y se mantienen siempre perpendiculares a cada superficie equipotencial, que tiene una forma, igual o parecida a la del electrodo y de tal modo que las equipotenciales suficientemente alejadas del electrodo, resultan ser esféricas o semiesféricas. Se analizará el electrodo dispersor de forma hemisférica o semiesférica.

En la Figura 4 se representa un electrodo de radio "a" al cual se le hace circular una corriente "I". La densidad de corriente a una distancia "x" es:

$$\delta_{(x)} = \frac{I}{S_{(x)}} = \frac{I}{2\pi \cdot x^2} \quad (1)$$

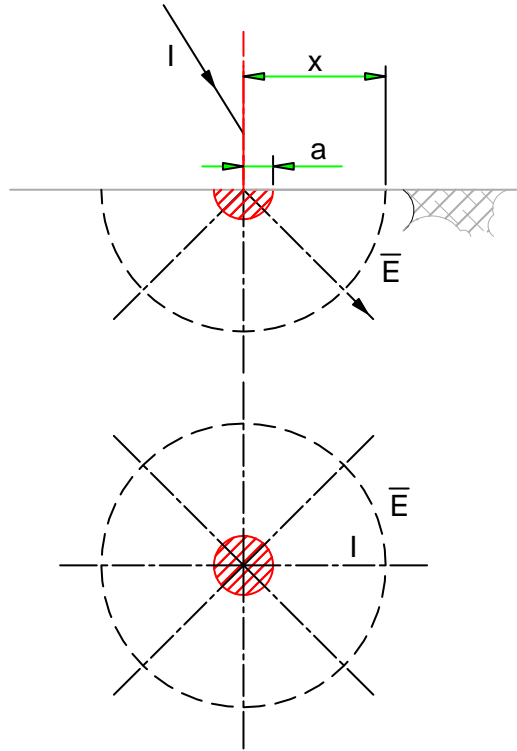


Figura 5

El campo eléctrico $E_{(x)}$ producido por la corriente I , se expresa por la ley de Ohm microscópica:

$$E_{(x)} = \rho \cdot \delta_{(x)} \quad (2)$$

Donde: ρ = resistividad de terreno

La diferencia de potencial U_{12} entre dos puntos de coordenadas X , X_1 y X_2 es:

$$U_{12} = U_1 - U_2 = U_{X_1} - U_{X_2} = \int_{X_1}^{X_2} E_{(x)} \cdot dx \quad (3)$$

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X_2} \right] \quad (4)$$

Si $X_1 = a$ (radio del electrodo) y $X_2 = x$, en la ecuación (4) resulta la ecuación (5) y la Figura 6, que mediante tres voltímetros “imaginarios” nos permite comprender las siguientes ecuaciones:

$$U_{ax} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{x} \right] = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot a} \left[1 - \frac{a}{x} \right] \quad (5)$$

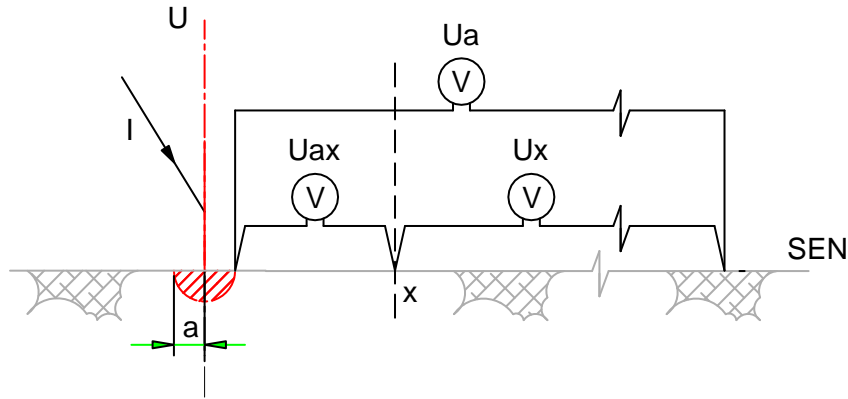


Figura 6

El potencial absoluto del electrodo “ U_a ” que es el que tiene con respecto al SEN (suelo eléctricamente neutro) se tiene con la siguiente fórmula

$$U_a = \lim_{x \rightarrow \infty} U_{ax} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot a} \quad (6)$$

y por definición, resulta la resistencia de dispersión “ R_d ” o de puesta a tierra del electrodo dispersor hemisférico:

$$R_d = R_{PAT} = \frac{U_a}{I} = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} \quad (7)$$

Por otra parte, observando la Figura 6, el potencial absoluto del electrodo “ U_a ” que es el que tiene con respecto al SEN (suelo eléctricamente neutro) se tiene también con la siguiente fórmula

$$U_a = U_{ax} + U_x \quad (8)$$

De la cual resulta que el potencial absoluto “ U_x ” del punto x es:

$$U_x = U_a - U_{ax} \quad (9)$$

$$U_x = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{x} \quad (10)$$

La Figura 7 muestra la variación de U_{ax} y U_x en función de x :

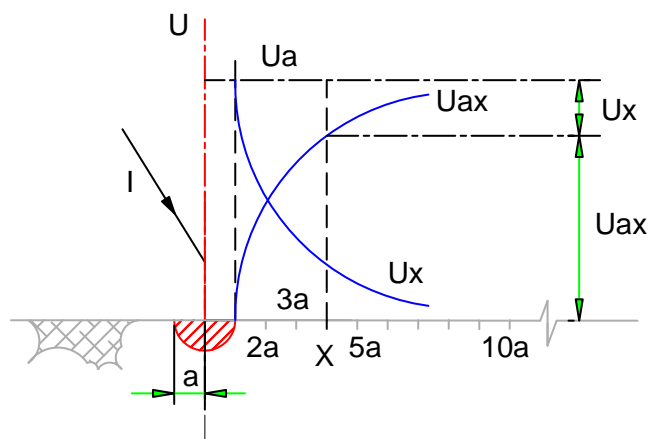


Figura 7

Si consideramos un electrodo puntual en la superficie de un terreno homogéneo de resistividad ρ (Figura 8), el potencial U_1 a una distancia X_1 del mismo (debido a una corriente inyectada, I) será:

$$U_1 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{X_1} \quad (11)$$

y a otra distancia $X_2 > X_1$ el potencial será:

$$U_2 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{X_2} \quad (12)$$

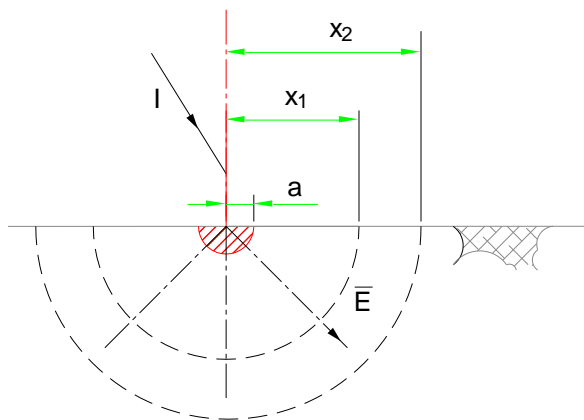


Figura 8: Electrodo simple y radios de influencia

La resistencia entre ambas capas será:

$$R_{12} = \frac{(U_1 - U_2)}{I} = \frac{\rho \cdot (X_2 - X_1)}{2 \cdot \pi \cdot X_1 X_2} \quad (13)$$

Al diferir X_1 y X_2 una cantidad muy pequeña, dx , se tiene:

$$R_{12} = \frac{\rho \cdot (dX)}{2 \cdot \pi \cdot X^2} \quad (14)$$

De aquí se observa que la corriente “ I ” va atravesando sucesivamente capas o conos cuyas resistencias decrecen con el cuadrado de la distancia. Por ello las capas de mayor radio

contribuyen poco en la resistencia total, que dependerá esencialmente de las capas más próximas al electrodo.

Para establecer una toma de tierra es necesario medir la resistencia cuando está instalada, sea cual fuere su aplicación. El cálculo de las resistencia de tomas de tierra a partir de los valores medio de resistividad de la zona, pueden conducir a importantes errores de medición.

Como en todos los casos, la resistencia de una toma de tierra puede expresarse por el cociente de una diferencia de potencial y una intensidad de corriente, pero, en nuestro caso, esta expresión resulta especialmente difícil, debido a las características del terreno, considerando como un conductor eléctrico y que vamos a examinar a continuación,

5 Teoría de la Medición de Puesta a Tierra:

Seguiremos para el desarrollo de esta teoría con el mismo suelo homogéneo e isótropo. Supongamos que en este suelo colocamos un electrodo semiesférico que llamaremos C_1 “de corriente principal” y otro igual que llamaremos C_2 situado a una distancia D del mismo. (Ver Figura 9). Si conectamos sobre estos dos electrodos una fuente de tensión alterna E se cerrará el circuito a través del suelo y se generará una corriente alternada I , que supondremos de entrada en un momento dado sobre el electrodo C_1 e I' , de salida, en C_2 .

Supongamos que, además de estos dos electrodos que llamamos de corriente, colocamos otros dos P_1 y P_2 , que llamamos de potencial o “sondas de potencial”.

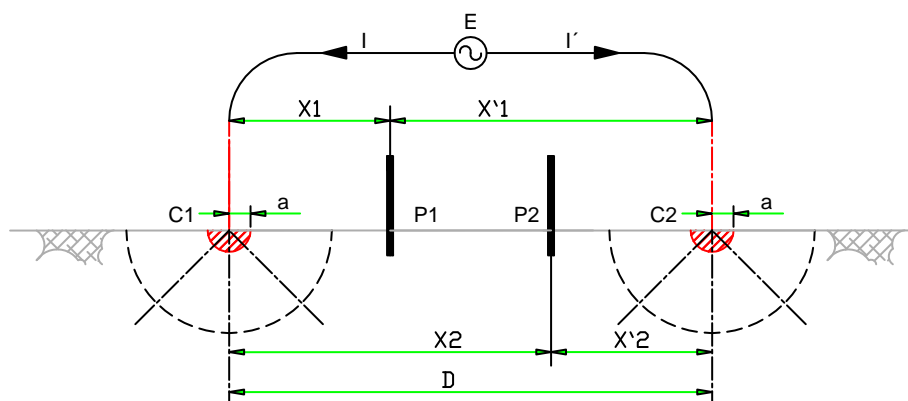


Figura 9

Evidentemente se deberá cumplir que:

$$I = - I' \quad (15)$$

Estas dos corrientes producen los siguientes potenciales absolutos en P_1 y P_2 :

$$U_{P_1} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{X_1} \quad U'_{P_1} = \frac{\rho \cdot I'}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{X'_1} \quad (16)$$

$$U_{P_2} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{X_2} \quad U'_{P_2} = \frac{\rho \cdot I'}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{X'_2} \quad (17)$$

En consecuencia, de las ecuaciones (15), (16) y (17), los potenciales totales de los puntos P_1 y P_2 serán:

$$U_{TP_1} = U_{P_1} + U'_{P_1} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} \right) \quad (18)$$

$$U_{TP_2} = U_{P_2} + U'_{P_2} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X'_2} \right) \quad (19)$$

La diferencia de potencia entre P_1 y P_2 valdrá:

$$U_{RP_2} = U_{12} = U_{TP_1} - U_{TP_2} \quad (20)$$

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} - \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X'_2} \right] \quad (21)$$

Esta es la expresión de la teoría unificada cuyas aplicaciones veremos a continuación en los párrafos siguientes.

Mediciones de la resistencia de una toma de tierra (resistencia de dispersión)

Sea el electrodo semiesférico C_1 de radio “a” (ver Figura 9) cuya resistencia de puesta a tierra deseamos medir. Como sabemos, la resistencia de puesta a tierra de la toma de tierra hemisférica es:

$$R_d = R_{PAT} = \frac{U_a}{I} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (22)$$

Donde ρ [$\Omega \cdot m$] es la resistividad volumétrica del suelo (supuesto homogéneo e isótropo), o bien la “resistividad aparente o equivalente” del suelo heterogéneo, es decir, aquella que tendría que tener un suelo homogéneo para que el mismo electrodo tuviera la misma resistencia de puesta a tierra que en el heterogéneo.

En la Figura 9 supongamos que se conecta P_1 con C_1 . Esto equivale a decir que:

$$X_1 = a \quad (23)$$

Además, de la Figura 9 se tendría que:

$$X'_1 = D - X_1 = D - a \quad (24)$$

$$X'_2 = D - X_2 \quad (25)$$

Hagamos:

$$X_2 = \alpha \cdot D \quad (26)$$

siendo α un parámetro a determinar, pero tal que:

$$\alpha \leq 1 \quad (27)$$

Reemplazando las ecuaciones (23), (24), (25) y (26) en la (21) resulta:

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{D - a} - \frac{1}{\alpha \cdot D} + \frac{1}{D - \alpha \cdot D} \right] \quad (28)$$

En la ecuación (28) vamos a agrupar los términos así:

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{a} - \varepsilon_{(\alpha)} \right] \quad (29)$$

De la ecuación (29), hallamos que:

$$R_m = \frac{U_{12}}{I} = \left(\frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{a} \right) - \left(\frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \varepsilon_{(\alpha)} \right) \quad (30)$$

Es decir:

$$R_m = R_d - \Delta R_m \quad (31)$$

donde R_m es la resistencia medida, R_d la “teóricamente verdadera” y ΔR_m un error absoluto sistemático de método, que vemos que es negativo, es decir, al medir R_m para encontrar R_d cometemos un error por defecto.

Vamos a hallar ahora los valores de la función $\varepsilon_{(\alpha)}$ que hacen que el error sistemático absoluto ΔR_m sea positivo (o nulo). De esta manera, la resistencia medida R_m tendrá un error positivo (o nulo), es decir por exceso.

Tendremos entonces que:

$$\varepsilon_{(\alpha)} = \left[\frac{1}{D-a} + \frac{1}{\alpha \cdot D} - \frac{1}{D-\alpha \cdot D} \right] = \left[\frac{1}{1-\frac{a}{D}} + \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{1-\alpha} \right] = \quad (32)$$

$$\text{Para que sea } \Delta R_m \leq 0 \text{ debe ser } \varepsilon_{(\alpha)} \leq 0 \quad (33)$$

Llevando la condición (33) a la ecuación (32) resulta una ecuación de segundo grado en:

$$\alpha^2 + \alpha \left(1 - \frac{2}{K} \right) - \left(1 - \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (34)$$

$$\text{En la cual es } K = \frac{D}{a} \quad (35)$$

La ecuación (34) admite tantas soluciones como valores pueda tener K , pero se puede demostrar que para valores de K superiores a 10 los valores de α que satisfacen la ecuación (34) sufren solo pequeñas variaciones, es decir, se demuestra que el menor error se comete con α entre 0,629 y 0,62 como se ve en la siguiente tabla:

$K = \frac{D}{a}$	$\alpha = \frac{X_2}{D}$
1	1
2	0,707
5	0,643
10	0,629
1000	0,618
∞	0,618

En conclusión: para que sea mínimo y positivo el error de la medición de la resistencia de dispersión de un electrodo dispensor de puesta a tierra, se deben ubicar:

1. El electrodo de corriente C_2 por lo menos a una distancia diez veces mayor que el radio “a” (o dimensión característica del electrodo a medir).
2. El electrodo de potencial P_2 a una distancia no menor al 62% de la distancia “D” entre los electrodos de corriente C_1 (a medir) y C_2 (auxiliar).

Estos conceptos se aclaran en el punto correspondiente a Mediciones Prácticas Mediante Aparatos”.

6 Teoría de la Medición de la Resistividad de los Suelos

Método de Wenner.

Este método fue desarrollado por Frank Wenner del US Bureau Of Standards en 1915.

Partiendo de la fórmula (21), Wenner, mediante un simple artificio, propuso un método de medición de la resistividad de terreno (ρ) que, por su sencillez, se ha adoptado universalmente. Este artificio consiste en adoptar la misma distancia entre sí para los cuatro electrodos de la Figura 9 con lo que ésta queda transformada en la Figura 10.

En efecto, se tiene:

$$X_1 = d$$

$$X'_1 = D - X_1 = 2.d$$

$$X_2 = 2.d$$

$$X'_2 = D - X_2 = d$$

$$D = 3.d$$

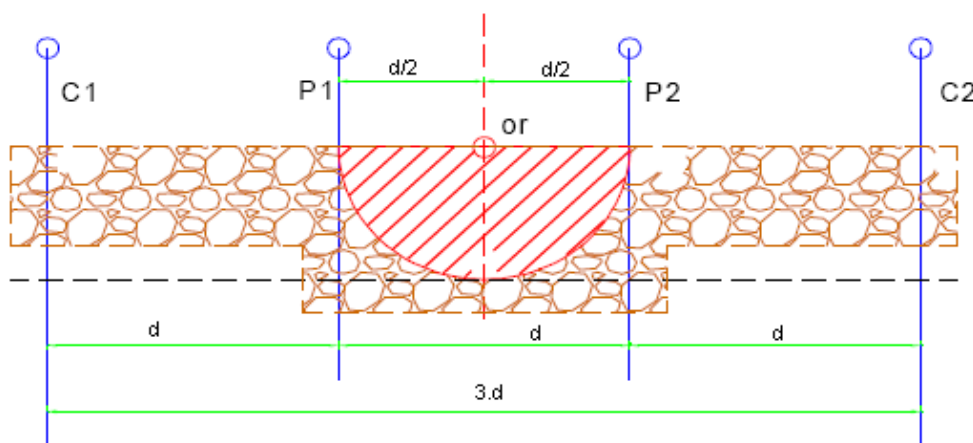


Figura 10

Si la profundidad “h” del hincado de los electrodos C_1 y C_2 y las sondas P_1 y P_2 es tal que: $h \leq \frac{d}{20}$ (36), resulta aplicable la ecuación (21), porque los electrodos se pueden suponer como si fuesen “hemisféricos”.

Por lo tanto, en la ecuación (21) se tiene que:

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{2.d} - \frac{1}{2.d} + \frac{1}{d} \right] \quad (37)$$

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{d} \right]$$

$$\rho = 2\pi \cdot d \cdot \left[\frac{U_{12}}{I} \right] = 2\pi \cdot d \cdot R_m$$

en donde R_m es la resistencia que se mide con el medidor (llamado telurímetro) en la conexión de la Figura 17.

La resistividad medida “ ρ ” con las distancias “ d ” alrededor del punto O_r es la resistividad “global” o “aparente” o “media” a la profundidad $h = d$.

Dado que toda la teoría que hemos desarrollado se basa en la del electrodo hemisférico, en la disposición de Wenner el punto O_r queda, de hecho, centrado en la línea de los cuatro electrodos. Dada la forma de las superficies equipotenciales de U_{1-2} , el valor de R_m será el mismo para todos los puntos comprendidos en la semiesfera de suelo de radio $d/2$, según lo destacamos en la Figura 10. Esto permite explorar el valor de resistencia a diferentes profundidades variando d .

7 Métodos Prácticos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra

Con la fin de medir de manera práctica los valores de la resistencia de dispersión de una toma de tierra (R_{PAT}) y de la resistividad media de los suelos (ρ), se ha diseñado un instrumento llamado telurímetro (de telúrico = referido a la tierra y metro = medir). Este instrumento incluye los elementos que se utilizan para determinar estos valores en otras metodologías más complicadas y engorrosas, que se usan con finalidades específicas.

Circuito básico del telurímetro:

Existe una variedad de circuitos, pero esencialmente todos se reducen al esquema de la Figura 11 .

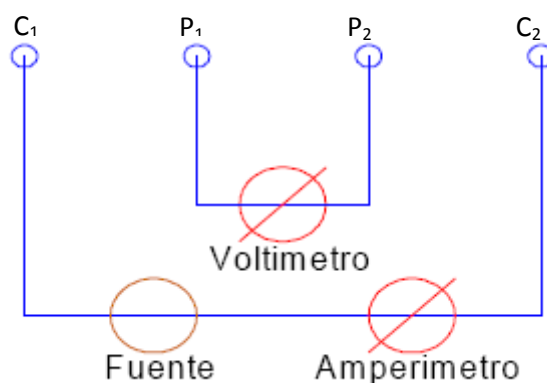


Figura 11

La comparación de la Figura 11 con la Figura 9 nos permite ver que los cuatro bornes corresponden a los electrodos C_1 , P_1 y P_2 y C_2 sobre los que hemos desarrollado la teoría.

Entre los bornes $C_1 - C_2$ está conectada una fuente de alimentación y un amperímetro que entregan la corriente I de nuestra teoría y se mide su valor. Es de hacer notar que esta corriente es alternada. La corriente continua está universalmente contraindicada para mediciones de tierra.

La fuente está regulada de modo de producir una tensión constante, siendo esta una condición básica para las mediciones.

Entre los bornes $P_1 - P_2$ se mide U_{1-2} de nuestra teoría con un voltímetro. La lectura que da el instrumento es $R = U_{1-2}/I$

La resistencia de un electrodo de tierra normalmente es determinada con corriente alterna o corriente directa periódicamente alternada para evitar la posible polarización de los electrodos causados por la corriente directa. En cuanto a la frecuencia utilizada por muchos de los equipos de medición, se tiene que está en el rango de 50 a 150 Hz (muchas veces entre 93 y 128 Hz), para sistemas pequeños y medianos.

El conocimiento de la frecuencia de medición permite al equipo descartar o neutralizar las tensiones perturbadoras que se acerquen, con igual frecuencia, con la tensión generada por el propio instrumento. El uso de estos instrumentos se limita en la práctica a la verificación de puestas a tierra pequeñas y medianas. En el caso de sistemas eléctricos de gran tamaño en las áreas de distribución y transmisión el uso de bajas frecuencias (20 a 600 Hz) es el más utilizado y determina el valor estático de la puesta a tierra. Sin embargo, la mayoría de los fenómenos dinámicos que afectan a un sistema de transmisión o distribución de energía eléctrica, denotan una alta frecuencia. Así tenemos, por ejemplo, que las sobre tensiones atmosféricas, las fallas a tierra, las sobre tensiones de maniobra, etc. se ven caracterizados por frecuencias que oscilan por el orden de los MHz. La componente inductiva en grandes sistemas representa un mayor porcentaje de la impedancia total de puesta a tierra ya que el valor de resistencia de la misma suele ser de un Ohm o menos. De allí la importancia de tomar en cuenta esta componente a la hora de hacer un estudio del sistema de puesta a tierra de grandes sistemas.

En cuanto a la magnitud de las corrientes utilizadas en la medición de la resistencia depuesta a tierra se tiene que el uso de corrientes que van desde los pocos hasta los cientos de miliamperios para sistemas instalados en zonas urbanas, a fin de evitar posibles potenciales transferidos que son peligrosos para las personas cercanas al área del sistema. Para grandes subestaciones ubicadas fuera de zonas urbanas, donde existen probabilidades menores de que potenciales transferidos afecten personas o equipos en áreas vecinas, se pueden inyectar corrientes del orden de decenas de amperes. Esto no implica que no se puedan utilizar corrientes de baja magnitud en estos sistemas, aunque el uso de corrientes elevadas puede permitir un estudio más completo.

7.1 Método de los dos Puntos o dos Polos

En este método se mide el total de la resistencia del electrodo en estudio más la resistencia de un electrodo auxiliar. La resistencia del electrodo auxiliar se considera muy pequeña comparada con la del electrodo en estudio y por tanto el resultado de la medición es tomado como la resistencia del electrodo en estudio.

Normalmente este método se utiliza para determinar la resistencia de un electrodo simple en un área residencial donde se tiene además un sistema de suministro de agua que utiliza tuberías metálicas sin conexiones o aislantes plásticos (electrodo auxiliar). La resistencia del sistema de suministro de agua en el área se asume muy pequeña (alrededor de 1 Ohm) en comparación con la resistencia máxima permitida para un electrodo simple (alrededor de 10 Ohm).

Este método tiene algunos inconvenientes, como el hecho de que cada vez más los sistemas de suministro de agua utilizan tuberías plásticas; con lo que se hace más difícil conseguir una tierra auxiliar. Por otra parte no siempre se conoce el recorrido de las tuberías de agua, por lo que las áreas de resistencia del electrodo en estudio y las del electrodo auxiliar podrían solaparse; dando como resultado errores en la lectura. Además, el método de los dos polos puede llevar a grandes errores cuando se intenta medir la resistencia de un electrodo simple de pocos Ohmios; pero al menos puede dar una idea de la resistencia del sistema en estudio.

En la Figura 12 y Figura 13 se ilustra esta técnica. Obsérvese que los terminales C1 y P1 Y los terminales C2 y P2 son unidos mediante un puente para realizar esta medición.



Figura 12: Método de los dos puntos.

En equipos modernos el puente es realizado internamente por ellos al seleccionar el tipo de medición o método que se desea realizar.

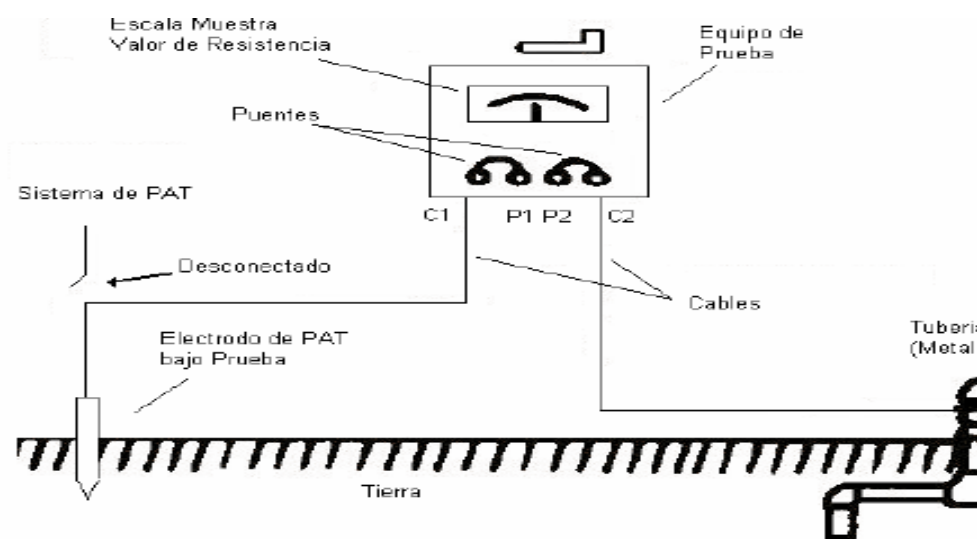


Figura 13: Método de los dos puntos

7.2 Método de los tres Puntos

En la Figura 17 se tiene la ilustración del método de los tres puntos o método de triangulación. En este método se utilizan dos electrodos auxiliares con resistencias R_y y R_z respectivamente. Estos dos electrodos se colocan de tal forma que conformen un triángulo con el electrodo en estudio. Se miden las resistencias entre cada electrodo y los otros dos y se determina la resistencia del electrodo en estudio, R_x , mediante la siguiente fórmula:

$$R_x = R_{PAT} = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$$

Donde R_1 , R_2 y R_3 quedan determinadas por las fórmulas indicadas en la Figura 14.

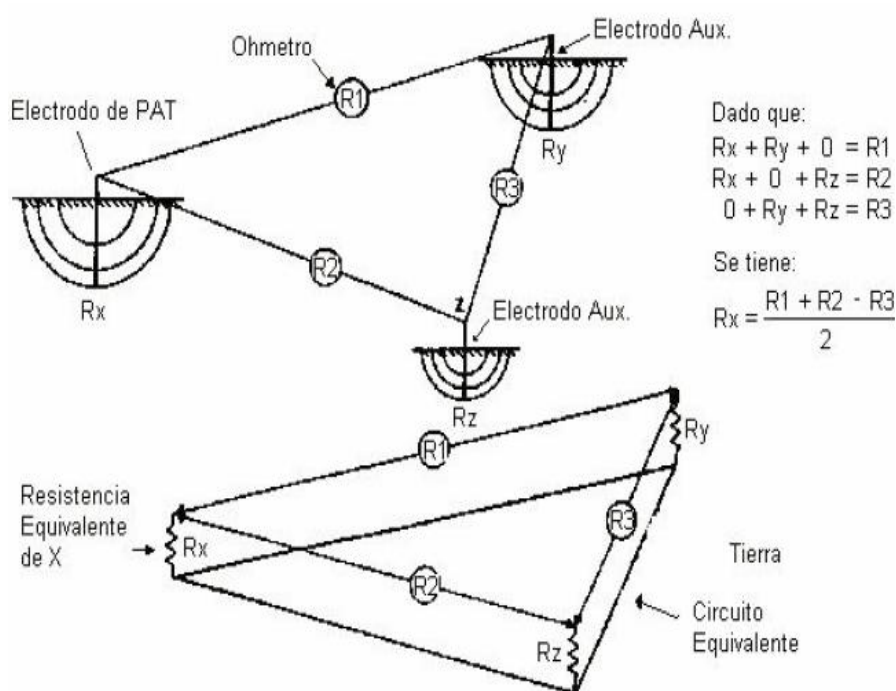


Figura 14: Método de los tres puntos

En este método se tratan de utilizar electrodos auxiliares que se presuman sean de resistencia similar al electrodo en estudio para obtener mejores resultados. Igualmente, se clavan los electrodos auxiliares de modo tal que queden todos los electrodos lo suficientemente alejados y no se solapen las áreas de influencia de la resistencia de cada uno y evitar resultados absurdos.

Se recomienda una distancia entre electrodos de 8 metros o más cuando se estudie un electrodo simple.

En este método existen influencias marcadas por objetos metálicos enterrados y no existe forma de eliminar dicha influencia. Tampoco es muy efectivo a la hora de evaluar valores bajos de resistencia o valores de resistividad muy altos del terreno involucrado donde la resistencia de contacto de los electrodos sea apreciable. Otra desventaja es que en este método se considera que el terreno es completamente homogéneo. Por estas razones este método es poco utilizado.

Sin embargo, puede ser útil cuando existen limitaciones de espacio y no se pueden colocar los electrodos en línea recta para realizar una medición con el método de caída de potencial, por ejemplo.

7.3 Método de Caída de Potencial

En la Figura 15 se observa la forma en que se instala el instrumento para realizar las mediciones por este método. Como se ve, los terminales CI y PI están conectados mediante un puente.

En esta figura se presenta el método del 62%.

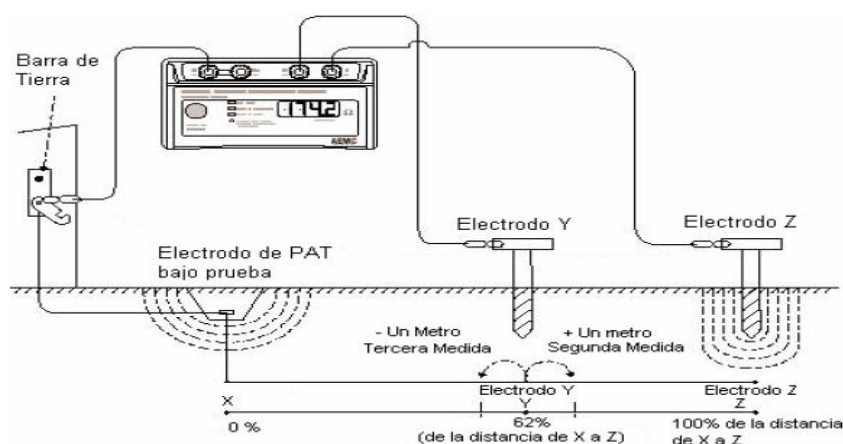


Figura 15: Método de la caída de potencial

El método consiste en inyectar corriente a través de un electrodo de prueba denominado de corriente y medir el alza de potencial mediante otro electrodo auxiliar denominado de potencial. Conocido el valor de tensión y el valor de corriente se podrá obtener mediante ley de Ohm el valor de resistencia. Los tres electrodos se mantienen en una línea recta y se va corriendo el electrodo de potencial hacia el electrodo de corriente para hacer sucesivas mediciones de resistencia.

En la Figura 16 se presenta otro esquema del método.

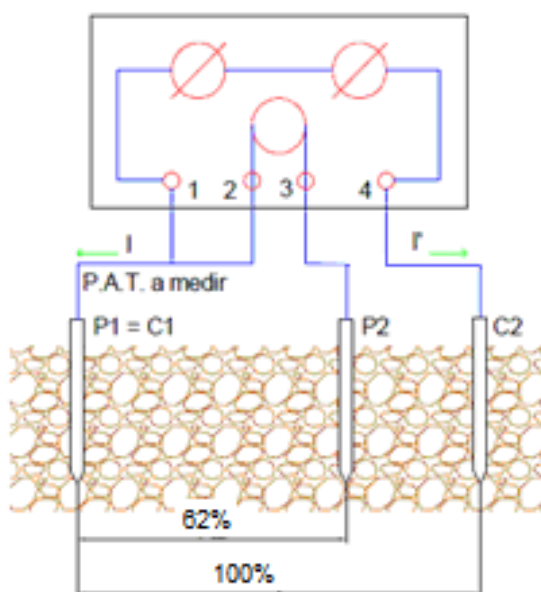


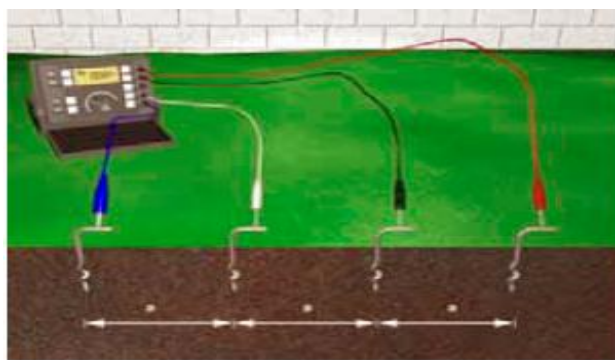
Figura 16

8 Método Práctico de Medición de la Resistividad de Suelo

En las Figura 17 (a) y (b) se describe gráficamente el método de .Wenner. Estos electrodos deben ser colocados en línea recta a una misma distancia entre ellos, a , y a una misma profundidad, b .

Las mediciones dependerán de la distancia entre electrodos y del contacto de estos con la tierra. La distancia b no debe exceder un décimo de la distancia a . El método consiste en inyectar una corriente conocida por los electrodos de prueba C_1 y C_2 . Entre los electrodos de prueba P_1 y P_2 se mide la diferencia de potencial resultante de la inyección de corriente anterior.

Con estos datos se puede calcular la resistencia y el valor de la resistividad del terreno a una profundidad b , será:



(a)

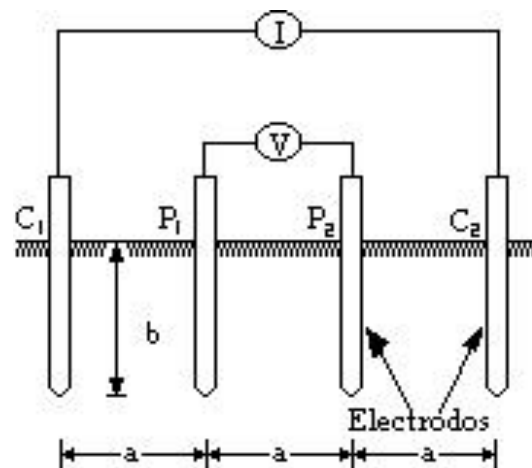


Figura 17: (a) Instrumental e instalación de electrodos; (b) Funcionamiento del método

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$$

$$\text{si } b \ll a$$

Donde:

ρ = Resistividad promedio a la profundidad b , (Ohm - m)

π = constante 3.1416

a = distancia entre los electrodos (m)

R = Resistencia medida por el instrumento (Ohm)

Como los resultados de la medición son normalmente afectados por materiales metálicos enterrados, se recomienda realizar la medición varias veces cambiando el eje de los electrodos unos 90° . Cambiando la profundidad y distancia de los electrodos se puede tener un valor de resistividad más aproximado al real y con ello un mejor diseño del sistema de puesta a tierra a construir.

La medición de la resistividad del suelo es comúnmente distorsionada por la existencia de corrientes de tierra y sus armónicas. Para corregir esto, muchos equipos tienen un sistema de control de frecuencia que permite seleccionar la frecuencia de medición con la menor cantidad de ruido y así obtener una medición clara.

9 Aspectos Prácticos de una Puesta a Tierra.

9.1 Valores de Resistencia Recomendados

Los valores recomendados por el Std IEEE 142-1991 son los siguientes:

- Para grandes subestaciones, líneas de transmisión y estaciones de generación: **1 Ohm**
- Para Subestaciones de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales: **1-5 Ohm**
- Para un electrodo simple: hasta **10 Ohm**

9.2 Formas Constructivas de una Puesta a Tierra

Existen dos tipos de sistemas de puesta a tierra; simples y complejos.

Los simples consisten en un electrodo aislado enterrado. Este sistema es el más utilizado y se puede encontrar en sitios residenciales.

Los sistemas complejos consisten en un conjunto de electrodos interconectados, mallas, platos de tierra y lazos o anillos de tierra. Estos últimos son instalados normalmente en subestaciones, oficinas centrales y centros de telecomunicaciones.

a) Varilla Copperweld o Jabalina.

Esta varilla es una de las más usadas, ya que es de bajo costo de material. Este tipo de electrodo está hecho de acero y recubierto de una capa de . cobre, su longitud es de 3.05 metros y un diámetro de 16 milímetros. Esta varilla se debe enterrar en forma vertical y a una profundidad de por lo menos 2.4 metros, esto por norma. También por norma se acepta que la varilla vaya enterrada en forma horizontal, siempre y cuando sea en una zanja de mínimo 80 cm de profundidad, pero no es muy recomendable.

La varilla Copperweld no tiene mucha área de contacto, pero sí una longitud considerable, con lo cual es posible un contacto con capas de tierra húmedas obteniéndose un valor de resistencia bajo.

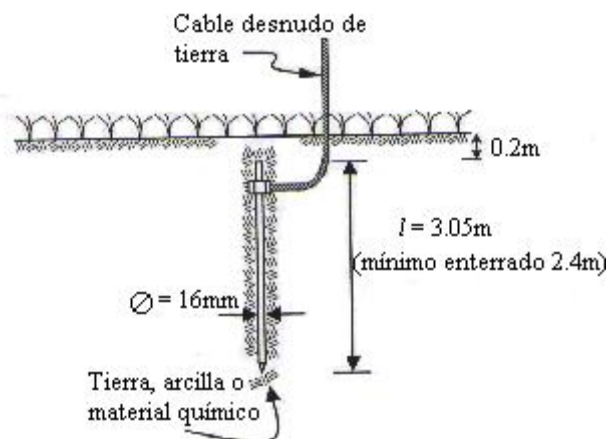


Figura 18: Detalle de instalación de electrodo de tierra tipo varilla Copperweld

En la tabla siguiente se muestra el porcentaje en que se disminuye el valor de resistencia de acuerdo a diferentes configuraciones de electrodos.

Número de electrodos	Valor original	El valor original se reduce al:
Un solo electrodo	100%	
Dos electrodos en línea		55%
Tres electrodos en línea		38%
Tres electrodos en triángulo		35%
Cuatro electrodos en simetría		28%
Ocho electrodos en simetría		16%

Tabla 3: Porcentaje de reducción del valor resistivo en función del tipo de configuración

b) Pica

Este tipo de electrodo de tierra tiene un área de contacto más grande que la varilla Copperweld, por lo que no necesita mucha longitud. Este electrodo se forma por un perfil de acero galvanizado, y puede ser en forma de cruz, de ángulo recto o en T. (Figura 19).

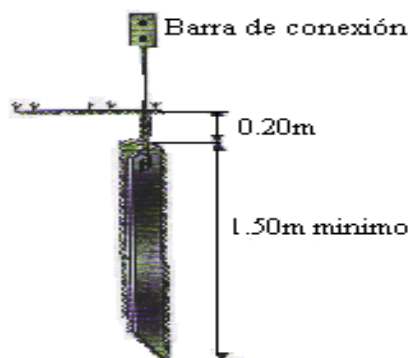


Figura 19: Pica

c) Placa.

Debido a que este electrodo tiene una gran área de contacto es recomendado en terrenos que tengan alta resistividad. Esta debe tener un área de por lo menos 2000 cm^2 y un espesor mínimo de 6.4 mm en materiales ferrosos y mínimo de 1.52 mm en materiales no ferrosos.

d) Electrodo en estrella.

Este tipo de electrodo se puede hacer con cable de cobre desnudo con ramificaciones de 60° de ángulo. Estos electrodos se utilizan en el campo, ya que por la longitud del cable se obtiene un valor de resistencia menor.

e) Electrodo de anillos.

Este electrodo consiste en una espira de cable de cobre desnudo, con un diámetro mínimo de 33.6 mm y una longitud mínima de 6 m en contacto con la tierra, las normas establecen que debe tener una profundidad de por lo menos 80 cm, así como también dice que se le pueden conectar electrodos.

f) Malla.

La malla se hace armando una red de conductores de cobre desnudos, esta malla se puede mejorar con algunos electrodos. Esta malla es muy utilizada en las subestaciones eléctricas, ya que reduce el riesgo de descargas. La malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0.30 a 1 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando retículas cuadradas.

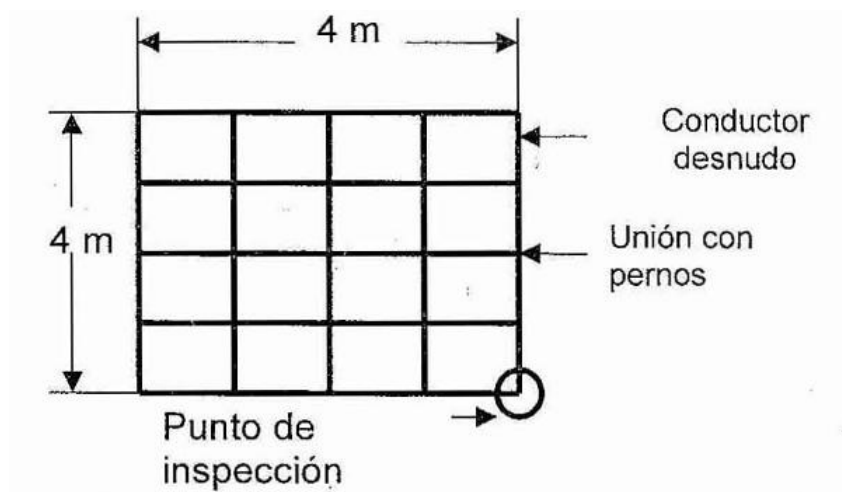


Figura 20: Malla

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. 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 poner a tierra a dos cables diferentes todos los equipos.

En la Figura 21 se pueden ver algunos ejemplos de estos sistemas de puesta a tierra.

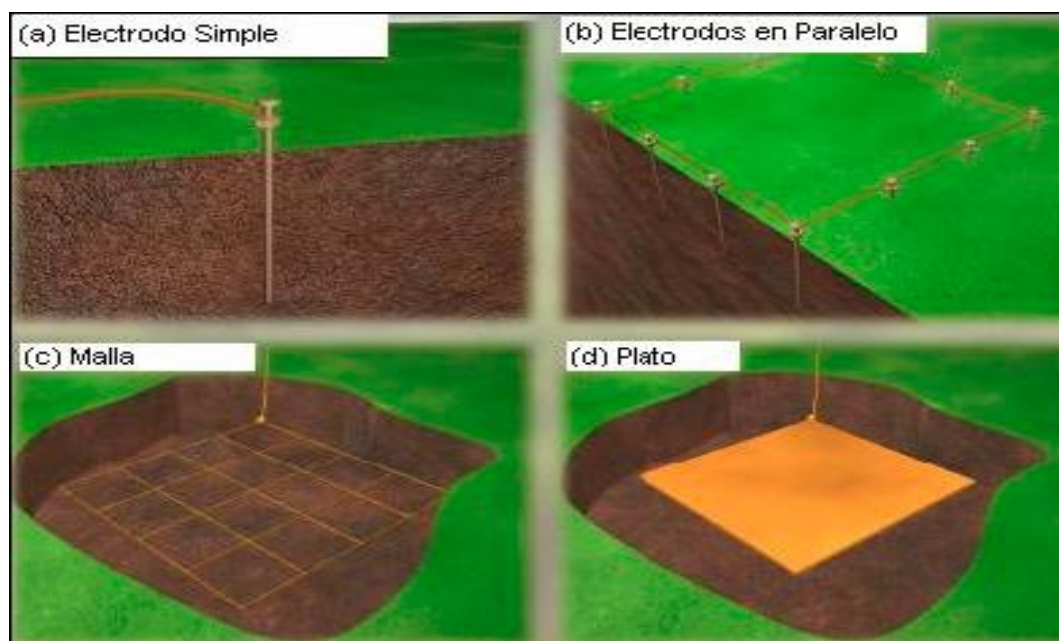


Figura 21: Electrodos de Puesta a tierra. a) Barra o jabalina; b) Arreglo de electrodos en paralelo; e) Malla; d) Plato.

9.3 Variación de la Resistencia según el Área de los Conductores

a) En función a su profundidad

A través de la expresión mostrada en la Figura 22, se pueden calcular los efectos de la variación de la resistencia de tierra en función de la profundidad alcanzada por un electrodo.

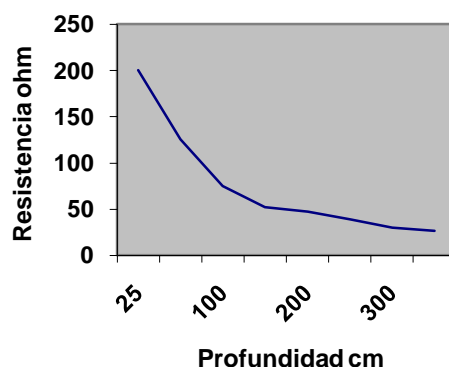


Figura 22: Resistencia de un electrodo en función de su profundidad

$$R = \frac{\rho}{2\pi L \left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right]}$$

Donde:

R = resistencia en Ω

L = longitud del electrodo en m

ρ = resistividad del terreno Ω -cm

r = radio del electrodo en cm

La profundidad mínima de enterrado de una varilla debe ser de 2.4 metros (8 pies). Para varillas de acero de sección circular, se requiere que su diámetro no sea menor a 1.59 cm (5/8") y para varillas de cobre o de acero recubiertas de cobre el diámetro mínimo debe de ser de 1.27 cm (1/2"), para terrenos duros es recomendable varillas con un diámetro de 1.91 cm (3/4").

a) En función del diámetro:

Ciertamente, la resistencia de un electrodo de sección circular se reduce al incrementarse su diámetro, sin embargo tiene un límite en el que ya no es recomendable aumentarlo debido a que el valor de la resistencia del terreno permanece prácticamente constante.

De acuerdo con la Figura 23 que se muestra más adelante, se puede calcular y graficar los valores de la resistencia en función al diámetro del electrodo.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L \left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right]}$$

Donde:

R = resistencia en Ω

L = longitud del electrodo en m

ρ = resistividad del terreno Ω -cm

r = radio del electrodo en cm

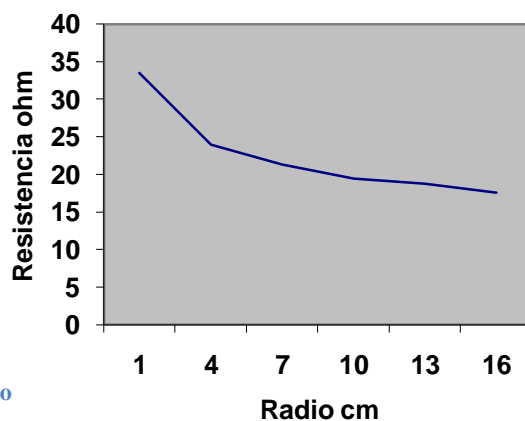


Figura 23: Resistencia de un electrodo en función del diámetro

Ejemplo:

Resistividad del terreno (ρ) = 1000 Ω .cm

Electrodo tipo varilla Copperweld: Longitud = 300 cm.

Diámetro = 1.584 cm

Radio = 0.7935 cm

Sustituyendo los datos en la expresión anterior, el primer resultado es $R = 33.5 \Omega$, sin embargo, si duplicamos el diámetro del electrodo, el nuevo resultado será $R = 29.8 \Omega$ que sólo representa una reducción del 11%, y si aumentamos 20 veces el diámetro original el valor obtenido será $R = 17.6 \Omega$ lo que representa solo una reducción del 47.4 %. Es por esto que se puede decir que no es recomendable invertir en electrodos de gran diámetro, ya que no se reduce considerablemente la resistencia, por lo cual deberán practicarse otros métodos como la malla o el plato.

10 Consideraciones Finales

Basándose en todo lo expuesto cabe decir que la circulación de la corriente eléctrica por el terreno no es, generalmente de naturaleza electrónica, como sucede cuando esa corriente atraviesa un conductor eléctrico, se trata de una corriente iónica, como la producida en los fenómenos electrolíticos. Además, no presenta una densidad uniforme sino que se desplaza en forma de filetes o capas, cuya intensidad y recorridos son aleatorios.

Tal como se expresa en la Figura 4, si se supone un electrodo de tierra, hundido a gran profundidad, en un medio perfectamente, homogéneo y difundiéndose en el terreno la corriente que llega a él, a través de un conductor aislado y de resistencia nula, esta corriente se dispersa en todas direcciones, de forma que todos los puntos situados a una distancia "d" del electrodo, presentarán propiedades eléctricas equivalentes; el conjunto de estos puntos constituye una superficie equipotencial.

A partir de esta primera superficie equipotencial, la corriente se difundirá de la misma forma, para constituir, a distancias múltiples de "d", "2d", "3d" ... etc, otras superficies, que se recubren entre sí y cuya área aumenta proporcionalmente al cuadrado de su distancia al electrodo.

Naturalmente, la resistencia al paso de la corriente es inversamente proporcional a la sección de paso, es decir, para la primera superficie equipotencial, a la media entre la superficie del electrodo y esta primera superficie, después a la media de las áreas de la primera y la segunda superficies equipotenciales, etc. En otras palabras, la resistencia para pasar de una superficie equipotencial a la siguiente disminuye en función del cuadrado de la distancia al electrodo. Por lo tanto, en la sección más pequeña, la comprendida entre el electrodo y la primera superficie equipotencial, es donde se localiza la resistencia mayor. De esta manera, se comprende que el elemento determinante de la resistencia de la toma de tierra no es la superficie del electrodo por sí misma, si no la de la primera superficie equipotencial que envuelve dicho electrodo a una pequeña distancia "d".

En la práctica, la resistencia de una toma de tierra es la correspondiente al terreno inmediatamente circundante al electrodo, hasta una distancia en la que los aumentos de capas sucesivas de terreno ya no producen incrementos apreciables de resistencia; en resumen, hasta una distancia en la que el potencial ya no varía.

Cuando una corriente atraviesa una toma de tierra, instalada en un terreno de supuesta resistividad homogénea, el 93% de la caída de tensión se produce en un radio de 1.8 m aproximadamente alrededor del electrodo, mientras que el 80% de la caída de tensión total se produce en un radio de 0.3 m, es decir, que la diferencia de potencial en las proximidades de los electrodos de puesta a tierra puede ser elevadísimo cuando se produce una corriente de defecto a tierra, y por lo tanto, puede resultar peligroso pisar en las proximidades de dichos electrodos. Es lo que se denomina tensión de paso.

Estas elevadas diferencias de potenciales pueden reducirse si se instalan electrodos en paralelo, a la vez que disminuye la resistencia de la toma. Pero entonces, si dos o más electrodos se implantan a distancias tales que no exista entre ellos la zona de resistencia nula a la que anteriormente hemos hecho referencia, se producirá cierta interpenetración entre las correspondientes superficies equipotenciales, lo que puede manifestarse en diferencias de potencial: es decir, entre los electrodos habrá una influencia eléctrica mutua. Las consecuencias de este fenómeno no serán las mismas si las tomas de tierra están conectadas entre sí, en paralelo o si por el contrario, pertenecen a sistemas eléctricos diferentes.

Los electrodos conectados en paralelo constituyen un caso frecuente: por ejemplo, cada vez que la instalación de un solo electrodo no permite alcanzar una resistencia suficientemente baja respecto al valor que le ha sido asignada, se recurre a instalar dos o más electrodos, que se conectan en paralelo hasta obtener, si es posible, el valor deseado.

11 Resumen de Pasos a Seguir para la Medición de la Resistencia de un Electrodo

En el proceso de determinar el valor de la resistencia de electrodo de tierra es necesario realizar algunas consideraciones: el valor de potencial medido varía con respecto a la separación del electrodo de potencial a la toma de tierra, por lo que se recomienda el realizar una gráfica de R en función de la distancia.

En el momento de la medición se deben seguir los siguientes pasos:

1. Desconectar del sistema de puesta a tierra en estudio todos los componentes que lo estén.
2. Conectar el equipo de medición a la barra o electrodo en cuestión.
3. Colocar el electrodo de corriente a una distancia conocida de la barra o electrodo bajo prueba.
4. Realizar varias mediciones de resistencia para diferentes ubicaciones del electrodo de potencial, sin mover el electrodo de corriente (el electrodo bajo estudio y los electrodos de prueba deben estar en línea recta)
5. Graficar la curva obtenida de resistencia en función de la distancia de separación entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de potencial.
6. Repetir lo anterior hasta obtener una curva con una porción plana bien demarcada como se muestra en la Figura 24, lo que muestra que la separación entre los electrodos de corriente es suficiente.

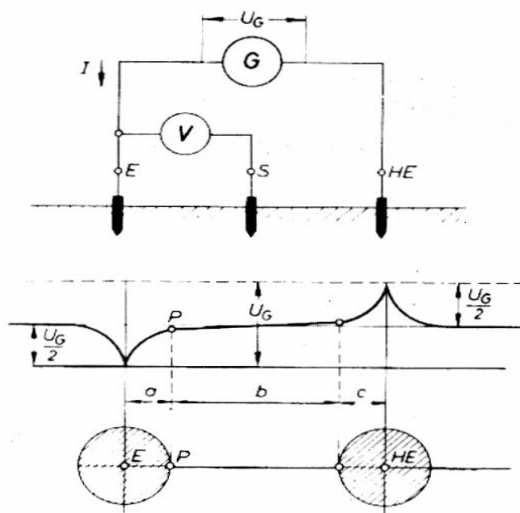


Figura 24:

Justificación del procedimiento anterior

La medición de la resistencia de puesta a tierra por este método genera gradientes de potencial en el terreno producto de la inyección de corriente por tierra a través del electrodo de corriente. Por ello, si el electrodo de corriente, el de potencial y el de tierra se encuentran muy cercanos entre sí, ocurrirá un solapamiento de los gradientes generados por cada electrodo; resultando una curva en la cual el valor de la resistencia medida se incrementará con respecto a la distancia, tal como se muestra en la Figura 25.

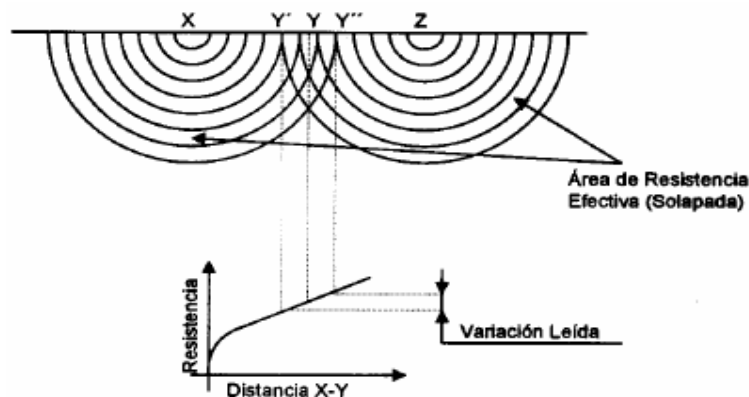


Figura 25: Solapamiento de los gradientes de Potencial

Al ubicarse el electrodo de corriente a una distancia lo suficientemente lejos del electrodo de tierra, la variación de posición del electrodo de potencial, desde el electrodo de tierra hasta el electrodo de corriente, no producirá un solapamiento entre los gradientes de cada electrodo, originándose entonces una curva como la mostrada en la Figura 26. En esta figura se observa que la curva es asintótica en el origen (toma de tierra) y asintótica a infinito en el final o electrodo de corriente; debido a la proximidad del electrodo de potencial al de tierra y corriente respectivamente. Además, existe una porción de la curva que permanece casi invariable, la cual será más prolongada o corta según la separación de los electrodos de corriente (Z) y electrodo bajo prueba (X).

El valor de resistencia asociado a este sector de la gráfica (Figura 26) será el correcto valor de la toma del Sistema de Puesta a Tierra. Este punto se conoce como zona de equilibrio.

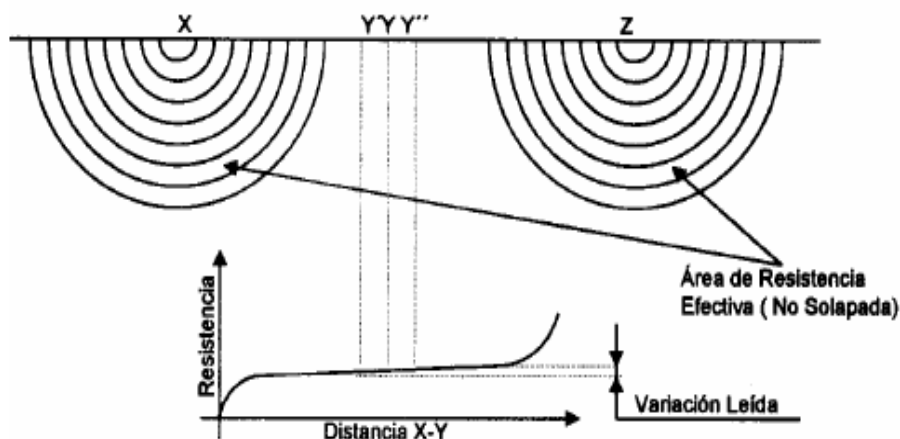


Figura 26:

De acuerdo a lo anterior es necesario determinar la distancia a la cual hay que ubicar el electrodo de corriente y potencial con respecto al electrodo de tierra, para evitar el solapamiento de los gradientes que genera cada uno de los electrodos y poder determinar así el valor de la resistencia de puesta a tierra que se desea conocer.

Desgraciadamente no hay un método para determinar con exactitud la distancia requerida entre el electrodo de tierra y el de corriente. Esto se debe a que las condiciones del suelo son muy variables. En suelos muy conductivos, la resistencia del volumen alrededor del electrodo es comparativamente pequeña y se pueden realizar mediciones aceptables con una separación de tan sólo unos 8 metros.

A medida de que las condiciones del suelo empeoran el área de influencia del electrodo crece. Entonces, distancias mucho más grandes pueden ser requeridas para salir del área de influencia del electrodo que se está probando.

En general, basado en numerosas pruebas, se utiliza una distancia entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de corriente igual a cuatro o cinco veces la longitud de la máxima dimensión del electrodo bajo prueba (otros autores recomiendan diez veces).

Por ejemplo, con un electrodo simple el electrodo de corriente sería ubicado a una distancia igual a cinco veces (o cualquier otro múltiplo escogido) del largo del electrodo simple; Con un plato o base enterrada, cinco veces la diagonal; con un disco enterrado, cinco veces el diámetro; etc. Estas son distancias aproximadas para realizar un primer intento. De no lograrse mediciones coherentes se debe repetir el proceso, variando la distancia, hasta lograrlo.

En el caso de un área pequeña o de un electrodo simple, se puede colocar el electrodo de corriente a unos 30 metros del electrodo bajo estudio (si el espacio permite llevar el electrodo de corriente a esa distancia) ya que a esta distancia se presume despreciable la influencia de uno respecto al otro. El electrodo de potencial se coloca a media distancia y se inicia el proceso de medición de resistencia como se describió anteriormente.

En cuanto a la distancia óptima para el electrodo de potencial para hallar el punto en que se estabiliza la curva de resistencia en función de la distancia del electrodo de potencial respecto al de tierra, se tiene que generalmente este punto de equilibrio se encuentra al 62% de la distancia entre el electrodo de puesta a tierra bajo prueba y el electrodo de corriente; por lo que el método de caída de potencial también se conoce como método del 62 %.

En la Tabla 4 se presentan como ejemplo las distancias aproximadas recomendadas para ubicar los electrodos de corriente y voltaje cuando se realiza la medición de resistencia de un electrodo simple de 2.54 cm de diámetro.

Distancia aproximada a los electrodos auxiliares usando el método del 62%		
Profundidad del electrodo bajo prueba [m]	Distancia al electrodo de potencial [m]	Distancia al electrodo de corriente [m]
1.83	13.72	21.95
2.44	15.24	24.38
3.05	16.76	26.82
3.66	18.29	29.26
5.49	21.64	35.05
6.10	22.58	36.58
9.14	26.21	42.67

Tabla 4: Método del 62 % (Distancia aproximada de los electrodos de prueba)

En la tabla anterior se considera que el suelo es homogéneo y el electrodo simple tiene un diámetro de 2.54 cm. Si el diámetro es de 1.27 cm se debe disminuir las distancias en un 10%. Si el diámetro es de 5.08 cm se debe aumentar las distancias en 10%.

Para comprobar la exactitud de los resultados y asegurar que el electrodo bajo prueba esta fuera del área de influencia del de corriente y viceversa, se cambia de posición el electrodo de potencial un metro o más hacia el electrodo de corriente y se toma una segunda medida. Luego se corre el electrodo de potencial un metro o más (respecto al punto inicial) hacia el electrodo bajo prueba y se toma una tercera medida. Si el valor medido se mantiene constante, las distancias entre los electrodos están bien. Si hay un cambio significativo en el valor de resistencia (30%), se debe incrementar la distancia entre el electrodo bajo prueba y los electrodos de potencial y corriente hasta que el valor de resistencia medido se mantenga casi invariable al mover el electrodo de potencial hacia un lado u otro una distancia de uno o dos metros y realizar una nueva medida.

La profundidad a la cual se entierran los electrodos de prueba (corriente, y voltaje) no afecta el resultado de la medición. Todo lo que se necesita es que tengan un buen contacto con tierra.

Una limitación del método del 62% es que asume condiciones ideales. Estas incluyen un distanciamiento adecuado entre los electrodos, siempre en línea recta y un suelo homogéneo. El suelo rara vez es completamente homogéneo y en zonas bajo construcción se verá particularmente afectado. Así el electrodo de potencial al 62% de la distancia total podría quedar en una pequeña zona que no represente al área en general. Esto podría provocar que la lectura fuese muy alta y por tanto se realizase un mejoramiento innecesario del sistema de puesta a tierra. De igual modo podría pasar que la lectura fuese muy baja y se dejase el sistema sin modificación, cuando tal vez requeriría algún ajuste. Además, podría pasar que los electrodos no estuviesen lo suficientemente separados al 62% y se tomase una lectura en la gráfica Resistencia en función de la distancia en el momento en que la resistencia está apenas aumentando (y no cuando la curva ya se ha estabilizado como se indicó anteriormente), y pensar, erróneamente, que se ha cumplido con los requerimientos.

La ventaja del método del 62% sin embargo, está en que una vez que se han verificado las distancias adecuadas para la medición de resistencia es sencillo y rápido realizar nuevas mediciones en sitio con fines de mantenimiento.