

Principios de Medición de la Resistencia a Tierra

Departamento de Ingeniería Total Ground

Resumen—Existen diferentes metodologías para realizar la medición a tierra; la más común, llamada método de Wenner se realiza con un equipo llamado telurómetro utilizando estacas o picas. Los fabricantes de los equipos de medición han desarrollado técnicas donde no se requiere el uso de dichas estacas; sin embargo, las mediciones no son equivalentes. La falta de conocimiento de este hecho por parte del usuario ha generado un mercado de medición errático donde los prestadores de servicios reportan de manera equivocada las mediciones poniendo en riesgo al usuario final por una errónea interpretación de resultados. Se trata en este documento una breve reseña sobre dichos métodos.

I. INTRODUCCIÓN

LA ausencia del sistema de puesta a tierra o una puesta a tierra de baja calidad, no sólo es una situación de peligro para el ser humano, sino que constituye un alto riesgo de falla para los equipos eléctricos y sobre todo, los electrónicos. Sin una puesta a tierra efectiva, se corre el riesgo de electrocución, errores en instrumentos, problemas con distorsión armónica, factor de potencia, entre otros. En general se debe tener en cuenta que si las corrientes de falla no cuentan con un camino adecuado a tierra, estas encontrarán otros caminos para llegar a tierra incluyendo a la gente o nuestros equipos, poniéndolos en riesgo de muerte o destrucción, respectivamente.

A. Propósito del Sistema

Más allá de los puntos anteriores, el propósito de la tierra física no radica sólo en la seguridad, se distinguen 4 propósitos fundamentales:

1) *Establecer una Referencia*: El sistema de puesta a tierra establece una referencia a tierra que permite estabilizar el voltaje del sistema eléctrico durante condiciones normales de operación. Dicha estabilización se logra con la puesta a tierra del conductor neutro (X_0).

2) *Crear un Camino Controlado*: Con el correcto diseño y ejecución de un sistema de puesta a tierra efectivo, se crea un camino de muy baja impedancia para que las corrientes de falla a tierra que pudiesen existir bajo alguna circunstancia, fluyan por un camino controlado.

3) *Asegurar el Funcionamiento de Protecciones*: Como parte fundamental de un sistema eléctrico, se tienen en

cuenta en la etapa de diseño una serie de dispositivos de protección contra sobrecorriente y contra falla a tierra; la existencia de un sistema de puesta a tierra eficaz genera un camino de muy baja impedancia para las corrientes de falla a tierra permitiendo que los dispositivos antes mencionados operen de la manera en que fueron diseñados.

4) *Limitar Diferencias de Potencial*: El sistema de puesta a tierra correctamente diseñado genera superficies equipotenciales, limitando así las diferencias de potencial que se pudieran generar entre diferentes cuerpos, por ejemplo:

$$a) \quad \text{Equipo} \leftrightarrow \text{Personal}$$

$$b) \quad \text{Personal} \leftrightarrow \text{Tierra}$$

$$c) \quad \text{Equipo} \leftrightarrow \text{Tierra}$$

$$d) \quad \text{Equipo} \leftrightarrow \text{Equipo}$$

B. ¿Por qué se mide el Sistema?

La resistencia a tierra de un sistema de electrodos se puede calcular de manera teórica según [1], [2], [3], [4] como se muestra en la ecuación (1). Donde C es la capacitancia en Farads y ρ la resistividad del medio en $\Omega \cdot m$, obteniendo la resistencia R en Ω . Para fines prácticos se utiliza la expresión de la ecuación (2), que considera un electrodo cilíndrico vertical con sección o área transversal A y longitud L .

$$R = \frac{\rho}{4\pi C} \quad (1)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

Estas ecuaciones son difícilmente acertadas, puesto que existen diversos factores que no permiten precisión en la realidad; por ejemplo, la resistividad del terreno que es variable en el tiempo dependiendo del clima, la composición no homogénea del terreno, entre otros.

Debido a lo anterior, se considera necesario realizar mediciones una vez que el sistema de electrodos ha sido instalado. Por otra parte, debido a otros factores como la corrosión del sistema, es recomendable llevar a cabo mediciones periódicas, como parte de un programa de mantenimiento preventivo, donde se debe evaluar la evolución del sistema a través del tiempo. En general se

Total Ground es el fabricante de electrodos de puesta a tierra no tradicionales más importante de México en los últimos años.

H.A. Ortiz-de-la-Vega es responsable del área de entrenamiento y normatividad para Total Ground (alex.ortiz@totalground.com.mx).

recomienda realizar mediciones dos veces al año en épocas climatológicas extremas; por ejemplo, en temporada de lluvias y en temporada de sequía. Legalmente los espacios laborales en México, están obligados a realizar este tipo de estudios una vez al año por parte de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, pudiendo solicitar evidencia documental en cualquier inspección. En España se especifica que dicha medición se llevará a cabo en la época del año que el terreno esté más seco, reparando con carácter de urgente los defectos encontrados.

Más allá de las variaciones que se puedan tener en la resistencia a tierra, la magnitud de esta medición es característica fundamental del sistema. En el sentido de proporcionar caminos de baja impedancia a tierra, ésta debe ser lo menor posible (lo más cercana a cero).

Existen diferentes normas y recomendaciones que señalan los valores de resistencia permitidos según la aplicación en cuestión, el valor más bajo se asigna a telecomunicaciones y regularmente se establece por debajo de 5Ω [5], aunque existen fabricantes de equipo sensible que requieren menos de 1Ω , para validar sus garantías.

C. La resistencia

La resistencia a tierra, depende de dos factores principales, la resistividad del terreno circundante y las características físicas del electrodo. El primero puede ser modificado durante la instalación en sus primeras capas, por medio de acondicionadores de terreno; sin embargo, las siguientes capas dependen exclusivamente de la naturaleza del terreno.

Las características físicas del electrodo más importantes son la superficie de contacto con la tierra y su profundidad ó longitud; la segunda, determina la facultad del electrodo para estar en contacto con capas más profundas del terreno, que son las más estables a lo largo del año al ser menos afectadas por el clima; además, mientras se tiene mayor profundidad, incrementa la posibilidad de entrar en contacto en el manto freático.

Por otra parte, la superficie de contacto del electrodo en conjunto con la técnica de instalación, determinan la resistencia de contacto que existirá entre el electrodo y la primera capa de tierra. La calidad de esta conexión es crucial en el desempeño del sistema, una mala resistencia de contacto se adicionará de manera directa a la medición global del sistema.

II. LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

El equipo de medición que se utiliza para medir la resistencia a tierra se denomina telurómetro ó telurímetro, en algunas regiones a manera de modismo, se le llama también terrómetro. Dentro de estos de esta gama de equipos se

pueden encontrar equipos analógicos (cada vez menos comunes) y digitales. El principio general de funcionamiento consiste en inyectar una señal conocida a la tierra y medir la diferencia de potencial en la tierra de manera que por medio la ley de ohm se pueda calcular la resistencia.

Las marcas más reconocidas en equipos de medición eléctrica, incluyen telurómetros dentro de su línea de productos; los más completos son capaces de realizar las pruebas de 2, y 4 puntos, selectiva y sin estacas, realizarlas a diferentes frecuencias e incluso advertir cuando la medición puede fallar. También existen equipos que se limitan a algunas de las técnicas anteriores.

La validez de los resultados no son exclusivos sólo del equipo de medición y que éste haya sido calibrado; es importante tener en cuenta que la técnica empleada puede ser la diferencia entre tener o no una buena medición. Entre las pruebas mencionadas en el punto anterior, debemos tener en cuenta que no todas son equivalentes. Se debe conocer su principio de funcionamiento para poder interpretar sus resultados.

III. LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN

A. Caída de Potencial

El método de la caída de potencial es el más común y el que tiene mayor reconocimiento, justamente es el que utilizan los llamados telurómetros y para su utilización es necesario

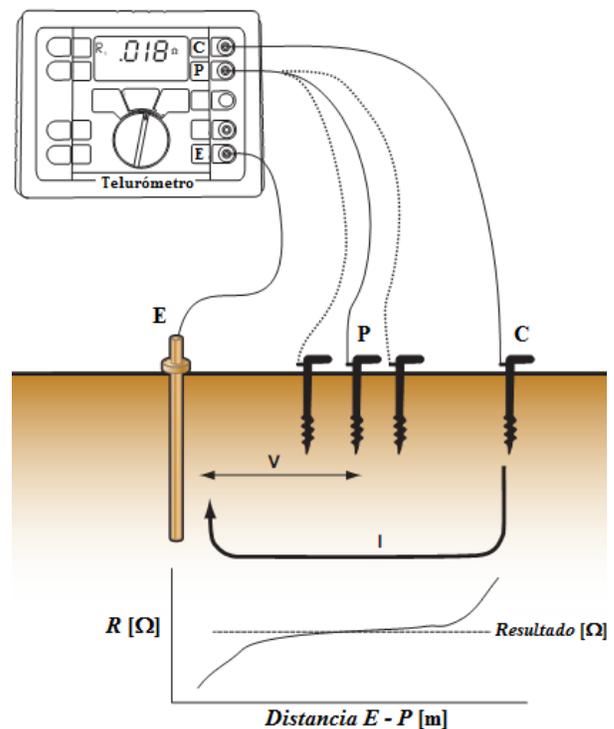


Figura 1. Esquema de conexión del equipo de medición para el método de diferencia de potencial tradicional o de tres puntos.

desconectar el sistema de electrodos ó el electrodo de puesta a tierra de la instalación.

Se requieren al menos 3 conexiones para realizar esta medición aunque existen algunos equipos avanzados que pueden requerir una cuarta conexión que ayuda a compensar la resistencia de los cables de prueba. Las tres conexiones se deben hacer a tierra donde una considera al sistema de electrodos en cuestión y las otras dos se ubican por medio de picas o estacas directamente enterradas en el terreno natural.

En la Figura 1 se muestra el esquema de conexiones del equipo de medición, se aprecian las conexiones:

- E: Conexión al sistema bajo prueba.
- P: Pica de referencia de potencial.
- C: Pica de inyección de corriente

Las picas C y P deben colocarse de forma tal que en vista superior, las tres conexiones formen una línea recta. El equipo de medición inyectará corriente alterna en la tierra por medio del electrodo a prueba E, y la pica C, mientras que la pica P mide la diferencia de potencial entre P y E. Se considera que el equipo de medición entonces cuenta con un voltímetro y un amperímetro internos de manera que se conocen la corriente y el voltaje, el mismo aparato es capaz de calcular la resistencia por medio de la ley de Ohm, donde $R=V/I$, siendo esta la medición que se visualiza en pantalla.

Para realizar la prueba, se mantiene la pica C a una distancia fija, mientras que la pica P, se desplaza a lo largo de la línea imaginaria que se forma entre E y C, de manera que se verifican las variaciones de resistencia en el trayecto. La NOM-022-STPS [6] recomienda una distancia E-C de 20 metros y desplazamientos de P a cada 3 metros comenzando a 1 metro de E.

Luego de realizar varias mediciones éstas se deben graficar de manera similar a la curva que se muestra en la parte inferior de la Figura 1, de las diferentes mediciones obtenidas, se tomará como válido el valor más cercano a la parte plana de la curva; es decir, al grupo de valores que no varían con la distancia. Esta parte plana implica que la pica P se encuentra fuera de las zonas de influencia del electrodo E y la pica C.

Las zonas de influencia son las capas de tierra que rodean al elemento enterrado y conforman el volumen de tierra que el electrodo ocupa para descargar cualquier corriente que este transporte. En teoría esta zona se considera una esfera cuyo radio depende de la profundidad del electrodo. En la realidad las zonas de influencia dependen también de la corriente que se expulsa y las condiciones del terreno.

Para obtener una medición correcta de la resistencia a tierra del sistema, se requiere que la pica P sea ajena a las dos zonas de influencia, la del electrodo en cuestión y la de la pica C y este hecho se relaciona con la parte plana de la curva antes mencionada. Tenga en cuenta que nunca tendrá

una zona 100% plana, la zona plana se relaciona con pendientes suaves; es decir, cambios pequeños entre mediciones.

Cuando se requieren mediciones muy precisas o los valores debieran ser muy bajos, donde la resistencia propia de los cables sumada al resultado esperado puede ser de consideración, el método de los 4 hilos puede ser utilizado para compensar la caída de voltaje en el conductor de la pica C.

1) *El atajo del 62%*: Más allá de ser otro método, ésta técnica representa una manera de utilizar el método de la diferencia de potencial de una manera más práctica pues requiere sólo una medición más dos más de comprobación.

Se deben colocar las conexiones E y C como se explicó con anterioridad, mientras que la pica P deberá separarse de E el 62% de la distancia entre E y C. Se toma la medida y para validarla se realizarán otras dos, recorriendo la pica P un metro hacia E y luego un metro hacia C tomando como referencia la ubicación de P en la primera medición.

Estadísticamente, si la curva tiene parte plana se encontrará al 62%, así que las mediciones de comprobación buscan confirmar este hecho, si las mediciones de comprobación son muy cercanas a la primera, ésta se tomará como el valor de la resistencia a tierra.

2) *La pendiente de Tagg*: Esta técnica es de gran ayuda pues no siempre es posible encontrar la parte plana de la curva de resistencias, debido a diferentes circunstancias; dentro de las más comunes se encuentra la imposibilidad de realizar mediciones a las distancias requeridas.

Cuando luego de nueve mediciones, no se identifica una parte plana, se permite usar esta técnica; se requieren las mediciones al 20%, 40% y 60% entre E y C para después sustituir los valores en la ecuación (3):

$$\mu = \frac{R_{60\%} - R_{40\%}}{R_{40\%} - R_{20\%}} \quad (3)$$

El coeficiente resultante se coteja en la tabla de pendientes de Tagg de donde se obtiene el valor de la relación P/C; es decir, a qué porcentaje de la separación entre E y C debe colocarse P.

B. Selectivo

Este método, también llamado comprobación selectiva, requiere un equipo especial, pues no cualquier telurómetro cuenta con esta característica, dichos medidores pueden medir la resistencia a tierra sin la necesidad de desconectarlo de la instalación; lo cual representa una gran ventaja.

Igual que el método de caída de potencial, este método requiere de la inyección de corriente y la medición de caída de voltaje, las reglas para la colocación de las picas E, P y C es la misma y se pueden utilizar tanto el atajo del 62% como la

pendiente de Tagg, así como otras reglas que se puedan encontrar en el método de la diferencia de potencial. Además de la conexión al sistema de electrodos mediante E, para este método se emplea un transformador de corriente con núcleo partido a manera de pinza o gancho en el sistema que se desea comprobar sin necesidad de desconectar la instalación. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.

La función del transformador de corriente consiste en registrar las corrientes ajenas al medidor; es decir, las que inyecta la instalación al sistema, para que el mismo equipo las tenga en cuenta y las elimine de la lectura desplegada mediante procesamiento interno de señales.

Este método es en general más seguro pues no requiere la desconexión del sistema y es donde radica su ventaja. Para sistemas de varios electrodos en paralelo permite evaluar la resistencia de cada uno de manera individual, de ahí que se le conozca como selectivo. En inglés a este método también se le conoce como ART, *Attached Rod Technique*.

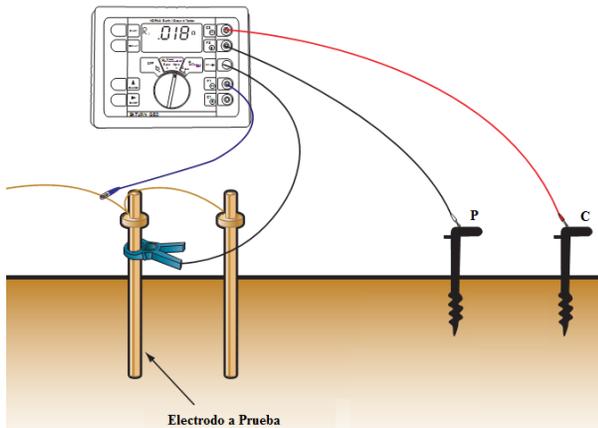


Figura 2. Esquema de conexión para la técnica selectiva. De esta manera se mide la resistencia del electrodo a prueba de manera individual sin desconectarlo.

C. Sin Picas

El método sin picas se utiliza para medir la resistencia a tierra de un solo electrodo cuando éste forma parte de un sistema de múltiples electrodos y se realiza por medio de ganchos.

Este método evita la tarea de desconectar cada electrodo del sistema para medir sus resistencias individuales, así como la tarea de encontrar lugares adecuados para clavar las picas de medición de otros métodos. La prueba se puede realizar en cualquier lugar donde no se cuente con acceso al suelo, por lo que permite realizar mediciones al interior de los edificios.

Se dice que se mide la resistencia del bucle de tierra formado por el electrodo en cuestión, el conductor equipotencial (de unión entre electrodos) y la tierra.

Para este método se colocan dos ganchos alrededor del electrodo o cable y cada gancho se conecta al equipo de medición. Se induce un voltaje V conocido por uno de los ganchos y se mide la corriente I en el segundo. El equipo determinará la resistencia del bucle a tierra que se genera. Si existiese un solo camino a tierra, la medición no será válida y se deberá utilizar algún otro método.

El principio de medición de este método se basa en el supuesto que el sistema tendrá múltiples electrodos de puesta a tierra conectados en paralelo; siendo así, la resistencia del resto del sistema $R_1 || R_2 || \dots || R_n$ sería muy baja comparada con la resistencia de un solo electrodo; el electrodo a prueba R_x . La corriente medida, responde a la Ley de Ohm de acuerdo con la ecuación (4):

$$I = \frac{V}{R_x + (R_1 || R_2 || \dots || R_n)} \quad (4)$$

De donde se despreja $R_1 || R_2 || \dots || R_n$ teniendo como resultado al despejar R_x una aproximación del valor de la resistencia a tierra del bucle en cuestión.

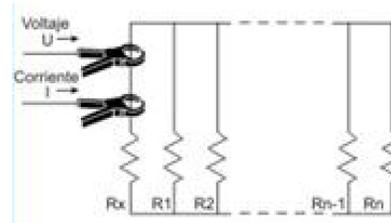


Figura 3. Esquema de conexión para la técnica sin picas. De esta manera también se logra medir la resistencia del electrodo a prueba R_x de manera individual sin desconectarlo.

El método sin picas, sólo mide la resistencia a tierra de un electrodo paralelo al resto del sistema de electrodos. Si lo anterior no se cumple, se estará midiendo un circuito abierto o la resistencia de un circuito de conductores de tierra.

D. Bipolar

El método bipolar se aplica cuando no es posible clavar picas para medición, en estos casos la prueba se reduce a una prueba de continuidad eléctrica.

Para realizar esta prueba, se debe tener acceso a una buena puesta a tierra; por ejemplo, tubería metálica del agua o algún electrodo natural no interconectado al sistema.

El equipo ocupará dos terminales, una se conectará al electrodo en cuestión mientras que la otra se conectará al electrodo natural.

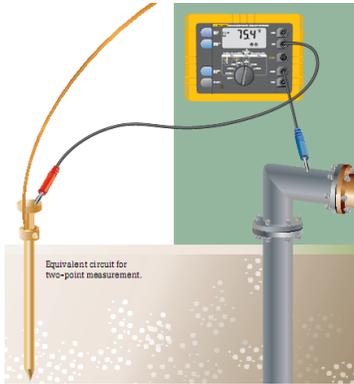


Figura 4. Ejemplo de conexión para la técnica bipolar.

IV. COMENTARIOS FINALES

En este documento, se presentaron diferentes métodos que pueden utilizarse para conocer la resistencia de puesta a tierra de diferentes sistemas. Cada técnica se debe implementar dependiendo de las situaciones de cada instalación.

Más allá de aplicar el método es importante conocer su principio de funcionamiento para lograr interpretar los resultados de manera correcta, pues como se revisó existen métodos que pueden falsear valores si se aplican en situaciones equivocadas.

Debemos tener en cuenta que el valor de resistencia de puesta a tierra que finalmente interesa para una aplicación; es la resistencia de todo el sistema de electrodos, incluyendo tanto los prefabricados como los naturales. Es por esta razón que la medición que interesa en los sistemas de puesta a tierra estructurados como el de Total Ground debe incluir la unión entre el electrodo prefabricado y los naturales; es decir, que para desconectar la aplicación sólo se debe desconectar el cable del borne superior del Acoplador de Impedancias, tal como se aprecia en la Figura 5. Lo anterior aplica para los métodos que involucren picas, pues si se utiliza el método sin picas en el cable del borne superior del acoplador, el equipo ve el sistema como un único electrodo y el equipo devolverá un mensaje de circuito abierto "OL" ó una medición por medio de caminos a tierra falsos. Recordemos que el método sin picas sólo es válido para sistemas multipunto y mide la resistencia de los electrodos de manera individual. Si sólo se cuenta con un sistema Total Ground, el método sin picas no debe ser utilizado.

Existen algunos modelos de equipos de medición; donde, dependiendo de cada fabricante, algunos son capaces de realizar todos los métodos mencionados y otros no. También existe la posibilidad de adquirir equipos sin todos los accesorios, pero con todas las capacidades; por lo que es importante que si se requiere contar con la capacidad para

realizar todos los métodos nos aseguremos de adquirir también todos los accesorios.

SE REQUIERE IMAGEN

Figura 5. Medición en Sistemas Total Ground

Más allá de lo expuesto en este documento, siempre será importante hacer referencia a la documentación del fabricante; por ejemplo, el manual de operación, manual del usuario y otros que publiquen de manera informativa.

V. REFERENCIAS

- [1] G. W. O. Howe, "Capacity of Radio-Telegraph Antennae," *The Electrician*, vol. 73, p. 829,839and906, 1914.
- [2] E. Hallén, "Lösung zweir Potentialprobleme der Elektrostatik," *Arkiv för Matematik, Atronomi och Fysik*, vol. 21A, no. 22, 1929.
- [3] H. B. Dwight, "Calculation of Resistances to Ground and of Capacitance," *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 10, no. 22, p. 50, 1931.
- [4] H. B. Dwight, "Calculation of Resistances to Ground," *AIEE Transactions (Electrical Engineering)*, vol. 55, pp. 1319-1328, Dec. 1936.
- [5] ANSI/TIA-942, *Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers*.
- [6] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, *Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-2005, Mantenimiento de las Instalaciones Eléctricas en los Centros de Trabajo - Condiciones de Seguridad*. D.F., México: Diario Oficial, 2005.
- [7] FLUKE, "Principles, testing methods and applications.," *Earth Ground Resistance*.
- [8] LECOM, "Earth Ground Electrode Testers," *User Guide*.