

## **Medición de la resistencia de puesta a tierra**

### **Resumen:**

En este artículo se describen los métodos utilizados para medir la resistencia de puesta a tierra de una instalación, para cumplir con las reglamentaciones vigentes.

### **Desarrollo:**

La instalación de un sistema de puesta a tierra permite la protección de las personas y los bienes contra los efectos de las caídas de rayos, descargas estáticas, señales de interferencia electromagnética y corrientes de fugas a tierra. Por lo tanto, la ejecución correcta de la misma brinda importantes beneficios al evitar pérdidas de vidas, daños materiales e interferencias con otras instalaciones.

Las distintas normas de aplicación establecen que deben ponerse a tierra las partes metálicas de los aparatos e instalaciones que no pertenezcan al circuito de servicio, y puedan entrar en contacto con partes sometidas a tensión en caso de avería o establecimiento de arcos. Por este motivo, en los aparatos y en las partes de la instalación hay que prever un cable de puesta a tierra que se conecte directa o indirectamente a la toma de puesta a tierra, constituida por jabalinas y mallas de conductores enterrados convenientemente.

Para una acción eficaz, resulta primordial que la resistencia de puesta a tierra tome un valor tal que no origine tensiones peligrosas al circular la corriente de falla; por lo que su valor está perfectamente acotado por las normas de aplicación para los distintos tipos de instalaciones.

La base de un buen sistema de puesta a tierra comienza con la selección del mejor lugar de emplazamiento y el ensayo del suelo que rodeará a la toma, procurando localizar el área con la mas baja resistividad. Luego de su instalación, se debe ensayar la toma de tierra propiamente dicha, para verificar que su valor se corresponde con el de diseño. Finalmente se recomienda realizar controles periódicos para detectar cambios en los valores correspondientes.

Por todo lo anterior, la medición correcta de la resistividad del terreno y de la resistencia de puesta a tierra de una instalación determinada adquiere una importancia relevante.

En principio digamos que los valores que se pueden medir en la práctica se ven influenciados por una serie de factores que impiden obtener resultados con gran exactitud. Entre los mismos podemos citar la posible existencia de corrientes vagabundas de CC y de CA, el carácter electrolítico del terreno y su eventual polarización, la aparición de potenciales galvánicos, el acoplamiento inductivo y/o capacitivo con otros sistemas, la ocurrencia de lluvias cercanas al momento en que se hace la medición, las irregularidades en la composición geológica del terreno y su grado de compactación, etcétera.

Para disminuir los efectos de las corrientes vagabundas de CA, es conveniente que en las mediciones no se utilicen corrientes cuya frecuencia "fm" sea un múltiplo de la frecuencia de red "fr" (armónicas superiores). Adicionalmente se pueden utilizar filtros sintonizados adecuados. Por lo anterior, la norma IRAM 2281 recomienda que sea:

$$f_m = [f_r (2 n \pm 1) / 2] \pm 10 \text{ Hz} \quad \text{con "n" número entero}$$

Por otro lado, el uso de corrientes no unidireccionales evita la distorsión de los valores medidos por acción de los potenciales galvánicos y la polarización electrolítica.

Sin embargo hay que tener en cuenta que, cuando se utiliza corriente continua periódicamente invertida, los valores de resistencia obtenidos pueden no ser confiables para su uso con corrientes alternas. Asimismo, si las mediciones se efectúan con corriente alterna, los valores obtenidos a una frecuencia pueden no ser útiles para otra frecuencia muy distinta.

Como en algunos casos existen elementos de metal enterrado, conductos de agua subterráneos, etcétera; que pueden distorsionar las mediciones, se recomienda realizar varios ensayos con diferentes orientaciones entre sí.

Por lo tanto, los resultados de las mediciones deben someterse a un análisis crítico para identificar las posibles fuentes de error, y eventualmente replantear la forma de ejecución de los ensayos.

En algunos casos puede ser conveniente realizar una gran cantidad de mediciones utilizando distintos métodos y luego analizar las tendencias resultantes.

La resolución 207/95 del ENRE, el "Reglamento para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles" de la Asociación Electrotécnica Argentina y la norma IRAM 2281 establecen la forma en que deben realizarse estas mediciones.

En este artículo se describen las técnicas de medición de uso mas difundido, con corriente continua periódicamente invertida o con corriente alterna de frecuencia cercana a la de red, no pretendiéndose agotar la exposición de todos los métodos posibles de CC y de CA, como el puente de Wiechert-Zipp, el método de compensación de Behrend y otros.

#### Medición de la resistencia de dispersión a tierra por el método de los tres puntos

El método de medición con el puente de Nippold requiere el emplazamiento de dos tomas de tierra auxiliares, cuyas resistencias de dispersión a tierra designaremos como R2 y R3, mientras que la resistencia de la toma bajo ensayo se denominará R1.

En estas condiciones, se miden las resistencias  $R_{1-2}$ ,  $R_{2-3}$  y  $R_{1-3}$  comprendidas entre cada par de tomas, utilizando preferentemente un puente de corriente alterna. Como  $R_{1-2} = R_1 + R_2$ ,  $R_{2-3} = R_2 + R_3$  y  $R_{1-3} = R_1 + R_3$ ; resulta:

$$R_1 = (R_{1-2} + R_{1-3} - R_{2-3}) / 2$$

Las resistencias de cada uno de los electrodos auxiliares deben ser del mismo orden que la resistencia que se espera medir.

Si las dos tomas auxiliares son de mayor resistencia que la toma de tierra bajo ensayo, los errores en las mediciones individuales serán significativamente magnificados en el resultado final obtenido con la ecuación anterior. Para tal caso se recomienda colocar los electrodos a una gran distancia entre sí.

Para las tomas de tierra de áreas extensas, las que presumiblemente tienen bajos valores de resistencia, se recomienda que las distancias entre electrodos sean del orden de la mayor diagonal del área a medir.

Este método resulta dificultoso para instalaciones de puesta a tierra de grandes subestaciones y centrales generadoras, donde resulta preferible el método de la caída de tensión.

### Medición de la resistencia de dispersión a tierra por el método de los dos puntos

Este método resulta de una simplificación del expuesto precedentemente. En este caso, se mide la resistencia total de la toma de tierra bajo ensayo y de otra toma auxiliar, cuya resistencia de tierra se presupone despreciable frente a la primera.

Como es de esperar, el valor de resistencia que se obtiene de esta manera está sujeto a grandes errores cuando se usa para medir resistencias pequeñas, pero en algunas ocasiones es muy práctico para los ensayos "por sí o por no".

### Medición de la resistencia de dispersión a tierra por el método de la caída de tensión

El método consiste en inyectar una corriente de medición "I" que pasa por el terreno a través de la toma o dispensor de puesta a tierra a medir y por un electrodo auxiliar de corriente ubicado en un punto suficientemente alejado para ser considerado como integrante de la masa general del planeta (tierra verdadera). En estas condiciones se inca un segundo electrodo auxiliar de tensión ubicado a mitad de camino entre la toma bajo ensayo y el electrodo auxiliar de corriente, midiéndose la caída de tensión "U" que aparece entre la toma de tierra a medir y el electrodo auxiliar de tensión. Para medir la tensión se puede utilizar un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia interna, mientras que para medir la corriente se utiliza un amperímetro conectado directamente o a través de de un TI tipo pinza, que facilita el trabajo al controlar instalaciones existentes.

Por aplicación de la ley de Ohm, la resistencia  $R_1$  del dispensor resulta:

$$R_1 = U / I$$

Las resistencias de cada uno de los electrodos auxiliares no presentan requisitos tan estrictos como en los métodos anteriores, si bién se recomienda que el electrodo de corriente tenga una resistencia lo suficientemente baja como para permitir un adecuado paso de la corriente.

Si bién en teoría la influencia del dispensor se extiende hasta el infinito, debe considerarse que tal influencia varía inversamente con la distancia siguiendo una ley exponencial, pues la sección ofrecida a las trayectorias de corriente aumenta al alejarse del dicho dispensor.

Por lo anterior, a los efectos prácticos dicha influencia se concentra en las cercanías del dispensor y se torna despreciable a distancias superiores a los 50 m en el caso de tomas de áreas reducidas o de simples jabalinas

El método de la caída de tensión resulta adecuado para casi todos los tipos de mediciones de resistencia de puesta a tierra.

En el caso de una red dispensora extensa, puede aparecer una componente reactiva apreciable cuando la resistencia es menor que 0,5 Ohm, por lo que en rigor, el resultado obtenido con este método es el de la impedancia. Cabe señalar que para los casos en que la resistencia es menor que 0,2 Ohm, la influencia de la

componente reactiva puede tornarse crítica, siendo recomendable la realización de ensayos a diferentes frecuencias para discriminar las componentes activas y reactivas. Estos ensayos aún no han sido normalizados por el IRAM y son motivo de investigaciones especiales.

En una toma de tierra de área extensa, el electrodo de potencial se debe ir alejando de la toma bajo ensayo en forma escalonada, registrando el valor medido en cada escalón. Al graficar los valores obtenidos en función de la distancia entre la toma y el electrodo de tensión se obtiene una curva que tiende a nivelarse en un determinado valor, que representa el valor mas probable de la resistencia (impedancia) de la toma de tierra. En estos casos, también debe prestarse atención a la posibilidad de existencia de resistencias parásitas de conexión.

Cuando se aplica este método se debe tener en cuenta que pueden existir tensiones espurias provocadas por corrientes vagabundas en el terreno, capaces de alterar la medida. Por ello, interrumpiendo la corriente debe verificarse que la lectura del voltímetro sea nula o despreciable. Si no lo es, el método no es aplicable.

#### Medición de la resistividad por el método de los cuatro puntos

Generalmente la resistividad del terreno se mide por el método universal de cuatro puntos desarrollado por F. Wenner en 1915. El mismo resulta el mas seguro en la práctica para medir la resistividad promedio de volúmenes extensos de suelos naturales.

En este método se clavan en el suelo 4 electrodos pequeños (jabalinas) dispuestos en línea recta con la misma distancia "a" entre ellos y a una profundidad "b" que no supere 1/10 de "a" (preferentemente 1/20 de "a").

Entonces se inyecta una corriente de medición "I" que pasa por el terreno a través de los dos electrodos extremos y simultaneamente se mide la caída de tensión "U" entre los dos electrodos interiores, utilizando un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia interna.

La teoría indica que la resistividad promedio del suelo " $\rho$ " a una profundidad igual a la distancia "a" vale aproximadamente:

$$\rho = 2 \pi a U / I$$

Si se efectúan una serie de mediciones realizadas a diferentes distancias "a" se puede construir un diagrama de resistividades del suelo en función de la profundidad, que permite detectar la existencia de distintas capas geológicas en el terreno.

Cabe acotar que en los emplazamientos donde el terreno presenta diferentes valores de resistividad en función de la profundidad, la experiencia indica que el

valor mas adecuado para el diseño del dispersor a tierra es el que se obtiene a una profundidad mayor.

#### Medición de la resistividad utilizando muestras de suelo

La estimación de la resistividad del terreno a partir de la medición de la resistividad de una muestra extraida del mismo, se puede realizar empleando el método de los cuatro puntos en una caja prismática pequeña de sección transversal cuadrada, en la que se introduce el material extraido de la probeta respectiva.

Como es de esperar, el valor de resistividad que se obtiene de esta manera resulta menos exacto que el que se obtendría en el terreno real, pero en algunas ocasiones es el único camino posible.

#### Medición de la resistividad por el método de los dos puntos

Tanto el instrumento de Shepard como otros métodos semejantes de dos puntos, permiten efectuar una estimación rápida del valor de la resistividad de los suelos naturales, además de ser fácilmente transportable y permitir mediciones en volúmenes reducidos de suelos, como por ejemplo en el fondo de excavaciones.

El aparato consta de dos electrodos, uno mas pequeño que el otro, que se conectan a sendas pértigas aislantes. El borne positivo de una batería se conecta a través de un miliamperímetro al electrodo mas pequeño y el borne negativo al otro electrodo. El instrumento puede ser calibrado para expresar las mediciones directamente en Ohm-centímetro a la tensión nominal de la batería.

Cabe acotar que se han desarrollado una gran variedad de instrumentos digitales y analógicos que utilizan numerosas variantes de los métodos descritos anteriormente, brindando lecturas directas.

Por ejemplo, existe un gran parque de óhmetros marca Megger que utilizan un instrumento de bobinas cruzadas que opera como cocientímetro y posee un generador de CA accionado a manivela.

También hay equipos que utilizan generadores electrónicos de alta frecuencia para efectuar mediciones de puesta a tierra en torres de alta tensión sin desconectar el hilo de guardia, considerando que a esas frecuencias dicho hilo presenta una reactancia inductiva suficientemente elevada como para considerarlo un circuito abierto. Además hay que tener en cuenta que las descargas atmosféricas contienen componentes de alta frecuencia.

Finalmente digamos que durante las mediciones deben adoptarse medidas de seguridad apropiadas. Por ejemplo, se debe evitar que las manos, pies u otras partes del cuerpo cierren el circuito entre puntos que puedan alcanzar potenciales diferentes, pues existe la posibilidad de que se produzca una falla durante las mediciones. Esto es especialmente importante en el caso de los dispersores correspondientes a los descargadores de sobretensión, siendo recomendable su desconexión previa a la medición.

También hay que considerar que en la zona de medición pueden existir otros sistemas de puesta a tierra y redes eléctricas en servicio.

Asimismo no debe olvidarse que las mediciones se realizan mediante la inyección de una determinada tensión contra tierra, por lo que debe efectuarse una manipulación cuidadosa de los electrodos y conductores pertinentes.

Otro aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de que las mediciones provoquen el disparo accidental de las protecciones diferenciales, para lo cual deben adoptarse las precauciones pertinentes.