



Mantenimiento de los sistemas de puestas a tierra

Dr. Ingeniero Hugo E. Martínez Darlington
hemartinezd@yahoo.es

Los componentes que forman parte de un sistema de puesta a tierra, SPT, como es el conductor de cobre, pierde su efectividad después que han pasado algunos años, producto de la corrosión, daños que provocan las fallas a tierra o residuales, efectos de tipo mecánico e incluso descargas atmosféricas. El mantenimiento de un SPT es importante, incluso cuando el proyectista de la puesta a tierra haya tomado precauciones adicionales a los requisitos de la norma, tales como protección contra la corrosión y el sobredimensionamiento de los componentes. Todo programa de mantenimiento debe garantizar una continua actualización de SPT, para poder cumplir con las normas mediante inspecciones periódicas. Si una inspección muestra que es necesario hacer reparaciones, éstas deben realizarse sin retraso y no ser pospuestas hasta el próximo ciclo de mantenimiento.

La frecuencia del mantenimiento y la práctica que se recomienda, en cualquiera instalación, depende del tipo y tamaño de ésta, su función y nivel de tensión. Por ejemplo la norma chilena NCH ELEC. 4/2003 en su punto 10.4.4. dice, textualmente: *“La responsabilidad por el correcto diseño y construcción de una puesta a tierra corresponderá al proyectista y/o instalador a cargo del montaje de la instalación. El mantenimiento de las características de operación de la puesta a tierra será de responsabilidad del usuario de la instalación, así como también serán de su exclusiva responsabilidad los daños a las personas, y daños o fallas de funcionamiento de la instalación o equipos, que sean atribuibles a un deterioro o ausencia de la puesta a tierra”*. Sin embargo, la norma, también, chilena, NSEG 20 Ep 78, en sus puntos 10.4.1 y 10.4.2., textualmente dice: *“Periódicamente se deben efectuar mediciones en las instalaciones para observar si en ellas se mantienen las condiciones de diseño”* y *“Además de las mediciones, se controlará el estado de las puestas a tierra, en periodos en lo posible no superiores a cinco años utilizando para ello las camarillas de inspección o en su defecto efectuando excavaciones en distintos puntos de ellas”*, respectivamente. Por otra parte, las revistas de Procobre Chile, “Sistemas de puestas a tierra” y “Mallas de tierra”, basadas en las normas inglesas BS, recomiendan lo siguiente: En las instalaciones domésticas informa que se realicen pruebas cada 5 años y en las industriales cada 3 años. En los locales de acceso público se hagan inspecciones más frecuentes, estando con inspección anual las estaciones bencineras, los teatros, los cines y las lavanderías.

1. Plan de mantenimiento

El mantenimiento, como toda función administrativa, requiere actividades de análisis para conocer las fallas y sus medidas de remedio, el planeamiento para determinar los recursos necesarios y una programación para determinar la época de su realización.

Cuando se ejecuten trabajos de mantenimiento en un sistema eléctrico, que involucren los sistemas de puestas a tierra, se deben tener en cuenta las recomendaciones siguientes:

- Cualquier modificación que se realice al sistema de puesta a tierra debe ser aprobada por una persona calificada.
- Las conexiones a la puesta a tierra que no involucren equipos electrónicos o unidades interconectadas, todos los cables deben ir desnudos y acompañando a los conductores activos del sistema y por la misma canalización.



- En las conexiones a la puesta a tierra de equipos electrónicos todos los cables deben ir aislados en color verde o verde/amarillo.
- Los conductores a tierra que acompañan los circuitos eléctricos deben cumplir con los calibres especificados en la Tabla 10.23 de la norma NCH ELEC:4/2003 o 250-122 o 250-95 del NEC.
- Todas las conexiones de tierra deben ser con soldadura exotérmica o con conectores certificados.
- En ninguna parte se permitirá que la red equipotencial de los equipos electrónicos pierda la aislación.
- Los enchufes de los equipos electrónicos deben tener un polo a tierra aislado e identificados para la red regulada.
- Si se requiere hacer desconexiones de conductores de puesta a tierra, como primer paso, se debe medir y registrar la corriente circulante en el conductor y de ser diferente de cero, no se puede hacer la desconexión, sin tomar medidas alternativas, como puentes provisionales, mediante conectores. En este último caso, es necesario que la intervención esté asistida por personal idóneo.
- La instalación de antenas de telecomunicaciones o estructuras elevadas, debe ser objeto de un diseño de apantallamiento y equipotencialización, que especifique las condiciones de montaje que contemple los componentes de protección existentes.
- Todo electricista que vaya a intervenir sobre el sistema de puesta a tierra deberá informar por escrito a la administración y responsabilizarse de su trabajo. Así todo cambio que se haga deberá ser actualizado en los planos, en los cuales consignará la fecha de modificación.
- Se debe entregar una copia del plan a los electricistas que van a intervenir en el SPT.

En la Tabla 1 se presentan las acciones de mantenimiento que se deben hacer en el SPT.

Tabla 1. Mantenimiento de un sistema de puesta a tierra

Item.	Realizar a:	Acción preventiva
1	Seis meses	Revisión, aprietes y ajustes que sean necesarios. Revisión de estructuras de anclaje, aisladores y conectores
2	Cada año	Medición de resistencia de puesta a tierra. Medición de equipotencialidad. Revisión y ajustes necesarios. Revisión de estructuras de anclaje, aisladores y conectores
3	Cinco años	Evaluación de resistencia de cada puesta a tierra. Medición de equipotencialización de cada SPT Medición de resistencia de puesta a tierra de todo el SPT interconectado.
4	Diez años	Exploración de conexiones del electrodo de tierra, una muestra. Las actividades propias de cada año
5	Veinte años	Diagnosticar Evaluar Rediseñar Proyectar acciones correctivas

2. Parámetros que dan cuenta de una instalación de puesta a tierra

Los parámetros que se presentan a continuación pueden ser calculados a partir de relaciones, a veces empíricas, que tienen en cuenta las características de la instalación, o bien determinada mediante ensayos o pruebas en una instalación ya construida. A partir de estos parámetros se pueden dimensionar los elementos de la instalación de puesta a tierra, o bien dimensionar si su funcionamiento es correcto.

2.1. Tensión a tierra, V_t . Es la diferencia de potencial que se establece entre un electrodo de puesta a tierra y un punto que tiene un potencial cero (tierra no afectada), cuando por el electrodo circula una intensidad de corriente de falla residual, I_d . En la figura 1 se muestra, de forma esquemática, la tensión a tierra, V_t , y tres tensiones de contacto, V_{c1} y V_{c2} .

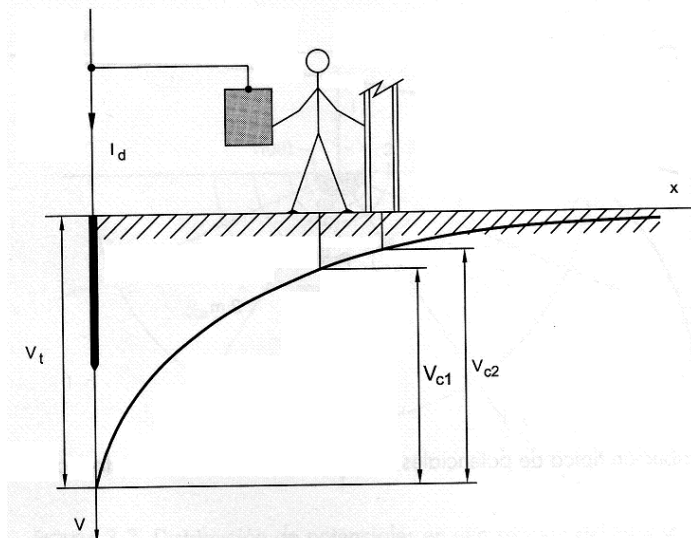


Fig. 1. Tensión a tierra y tensiones de contacto

Cuando se produce el funcionamiento de una puesta a tierra la tensión de todos los elementos metálicos que están conectados al electrodo resulta, prácticamente, igual a la tensión a tierra del electrodo

2.2. Resistencia de puesta a tierra, R_t . Se comprueba que, para un electrodo dado, con una configuración y dimensiones concretas, enterrado en un terreno de características dadas, la corriente de falla residual a tierra, I_d , es proporcional a la tensión aplicada al electrodo, V_t .

A la constante de proporcionalidad entre estas dos magnitudes se le denomina resistencia de puesta a tierra, R_t .



$$R_t = \frac{V_t}{I_d} \quad (1)$$

Un estudio detallado de la distribución de la intensidad de corriente, en frecuencia industrial, 50 Hz, pone de manifiesto que los fenómenos capacitivos e inductivos son irrelevantes, salvo casos excepcionales, por lo que la constante definida tiene, efectivamente, dimensiones de resistencia.

2.3. Tensión de contacto, V_c . Es la diferencia de potencial que aparece, como consecuencia de la avería de la aislación, entre dos partes *simultáneamente accesibles*, que en condiciones normales de utilización presentan una diferencia de potencial cero. Las *partes simultáneamente accesibles* pueden ser:

- Dos masas.
- Una masa y tierra.
- Una masa y un elemento conductor activo.
- Un elemento conductor activo y tierra.

En la figura 1 se presentan dos ejemplos de tensión de contacto: V_{c1} , tensión entre masa, M, y tierra; V_{c2} , tensión entre masa y un elemento conductor, EC. Es importante decir que la norma chilena NSEG 20 Ep 78 el término Tensión de contacto lo define como la elevación de tensión de un electrodo al que puede quedar sometida una persona, de modo que la trayectoria de la corriente pasa entre una mano y los pies o entre una mano y la otra.

2.4. Tensión de paso, V_p . Es la diferencia de potencial entre dos puntos en el suelo, separados un metro, que puede ser puenteadas por los pies de una persona que camina por un terreno afectado por el funcionamiento de una puesta a tierra. En la figura 2 se muestran, de forma esquemática, las tensiones de paso y transferidas.

2.5. Tensiones aplicadas. Cuando una persona entra en contacto con dos *partes simultáneamente accesibles* que tienen distintos potenciales, la tensión que queda aplicada en su cuerpo es algo menor que la diferencia de potencial entre las dos *partes simultáneamente accesibles*. Esto se debe a que siempre existe una caída de tensión en las resistencias de contacto que aparecen entre la piel y las partes en tensión.

2.5.1. Tensión de paso aplicada, V_{pa} . Se define como la parte de la tensión de paso que resulta directamente aplicada entre los pies de una persona, teniendo en cuenta todas las resistencias que intervienen en el circuito. La norma chilena NCH Elec. 4-2003 considera 2.000 Ohm, el NEC 1.000 Ohm.

2.5.2. Tensión de contacto aplicada, V_{ca} . Se define como la parte de la tensión de contacto que resulta directamente aplicada entre dos puntos del cuerpo humano, considerando todas las resistencias que intervienen. La norma chilena NCH Elec. 4-2003 considera 2.000 Ohm, el NEC 1.000 Ohm.

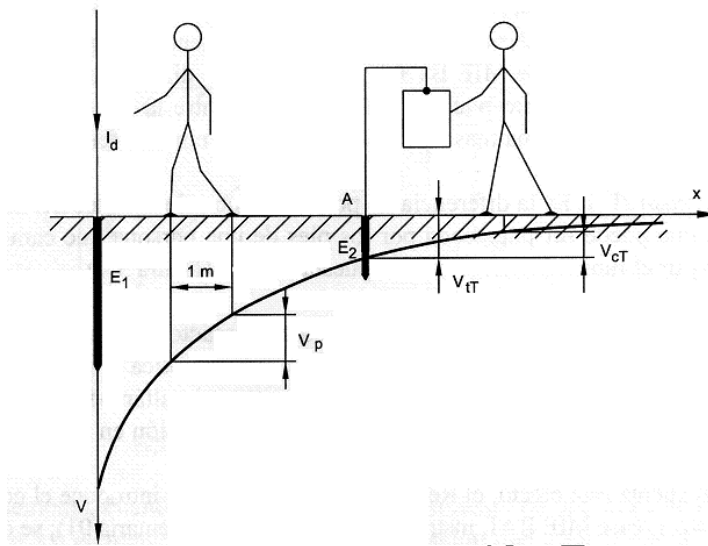


Fig. 2. Tensión de paso y transferidas

De acuerdo con las definiciones que se han indicado entre las tensiones de paso y contacto, con las correspondientes tensiones aplicadas, éstas se pueden, fácilmente, deducir de la figura 3, considerando a la resistencia del cuerpo humano $R_h = 2.000 \text{ Ohm}$.

$$V_{pa} = I_p R_h = \frac{V_p}{2000 + 2R_c} \cdot 2000 \quad (2)$$

$$V_{ca} = I_c R_h = \frac{V_c}{2000 + \frac{1}{2}R_c} \cdot 2000 \quad (3)$$

donde R_c es la resistencia de contacto pie-terreno. Para determinar la R_c se considera al pie como un electrodo en forma de placa plana de 200 cm^2 , aproximadamente, con lo que si se supone que el electrodo es de forma circular, de radio r , su valor es.

$$R_c = 1,6 \frac{\rho}{2\pi r} = 1,6 \frac{\rho}{2\pi \sqrt{\frac{200 \cdot 10^{-4}}{\pi}}} = 3\rho \quad (4)$$

Sustituyendo la expresión (4) en (2) y (3) se tienen las expresiones de las tensiones de paso y contacto aplicadas en función de las de contacto y de paso:

$$V_{pa} = \frac{2000}{2000 + 6\rho} V_p \quad (5)$$

$$V_{ca} = \frac{2000}{2000 + 1,5\rho} V_c \quad (6)$$

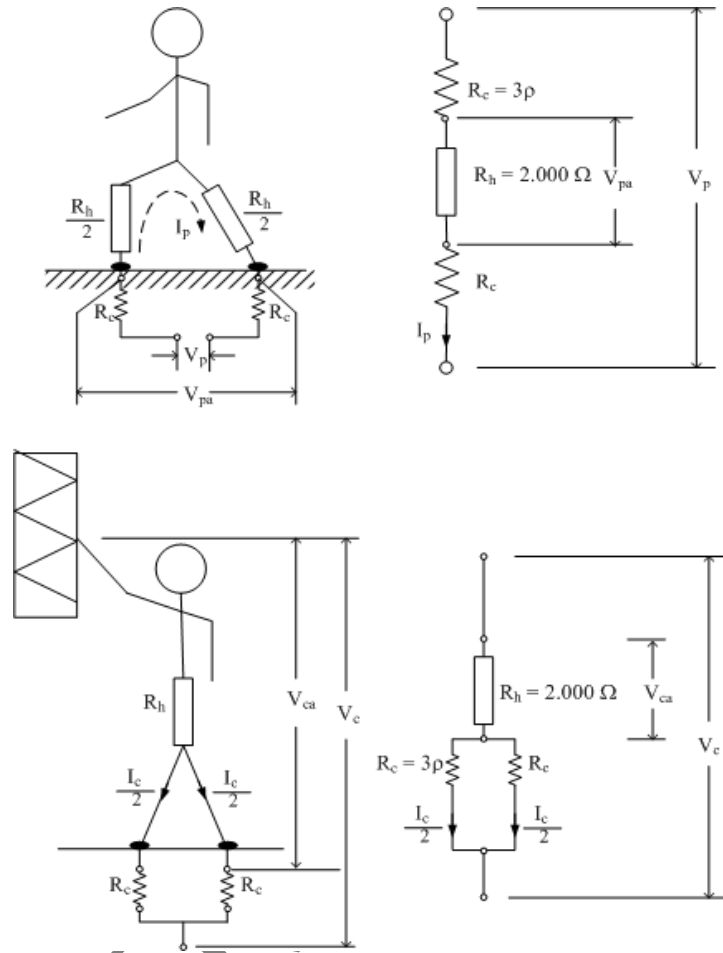


Fig. 3. Solicitación de tensión entre pies y mano pie.

Evidentemente las magnitudes de las tensiones aplicadas son siempre menores que los valores de las tensiones de paso y de contacto correspondientes

2.6. Tensiones transferidas. En la figura 2 se presentan dos instalaciones de puestas a tierra, distintas, cuyos electrodos, respectivos, E_1 y E_2 están ubicados a una distancia d . Si la distancia d no es muy grande, al drenarse una falla por E_1 , en el punto A, ubicado en el electrodo E_2 , aparece un potencial V_d , que se transmite a todas las masas y elementos metálicos conectados a E_2 . Se denomina *tensión a transferida*, V_{tT} , a la tensión que aparece en las masas y elementos metálicos de una instalación de puesta a tierra como consecuencia del funcionamiento de otra toma de tierra, próxima. En la figura 2 el funcionamiento de la instalación 1 tiene a todos los elementos de la instalación 2 con una tensión transferida, $V_{tT} = V_A$. De forma análoga se define *tensión de contacto transferida*, V_{cT} , como la tensión de contacto que aparece en una masa o elemento de una instalación de puesta a tierra, causada por el funcionamiento de otra puesta a tierra.

3. La función de las puestas a tierra en los sistemas eléctricos

En un sistema eléctrico los elementos que se conectan a tierra se clasifican en:

1. Neutros de generadores y transformadores
2. Masas
3. Elementos de protección (supresores de sobretensión, pararrayos y seccionadores de puestas a tierra)

3.1. Puesta a tierra de neutro de generadores y transformadores

En los sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica, las masas, que son la cubierta de los generadores y los transformadores, ferretería de las líneas aéreas, se encuentran siempre puestos a tierra; sin embargo, los neutros de los generadores y transformadores pueden estar aislados o conectados a tierra.

Si los neutros se mantienen aislados, las tensiones entre los conductores activos y las masas no están definidas, como se aprecia en la figura 4a. En caso de producirse una falla a tierra entre una fase y tierra, la fase que falla pasa a tener potencial cero, respecto de tierra, mientras que la tensión en las otras fases sanas y tierra pasa a tener la tensión entre fases, como se aprecia en la figura 4b. Luego en los sistemas con neutro aislado todas las aislaciones fase–masa deben estar dimensionada para soportar la tensión entre fases o de línea.

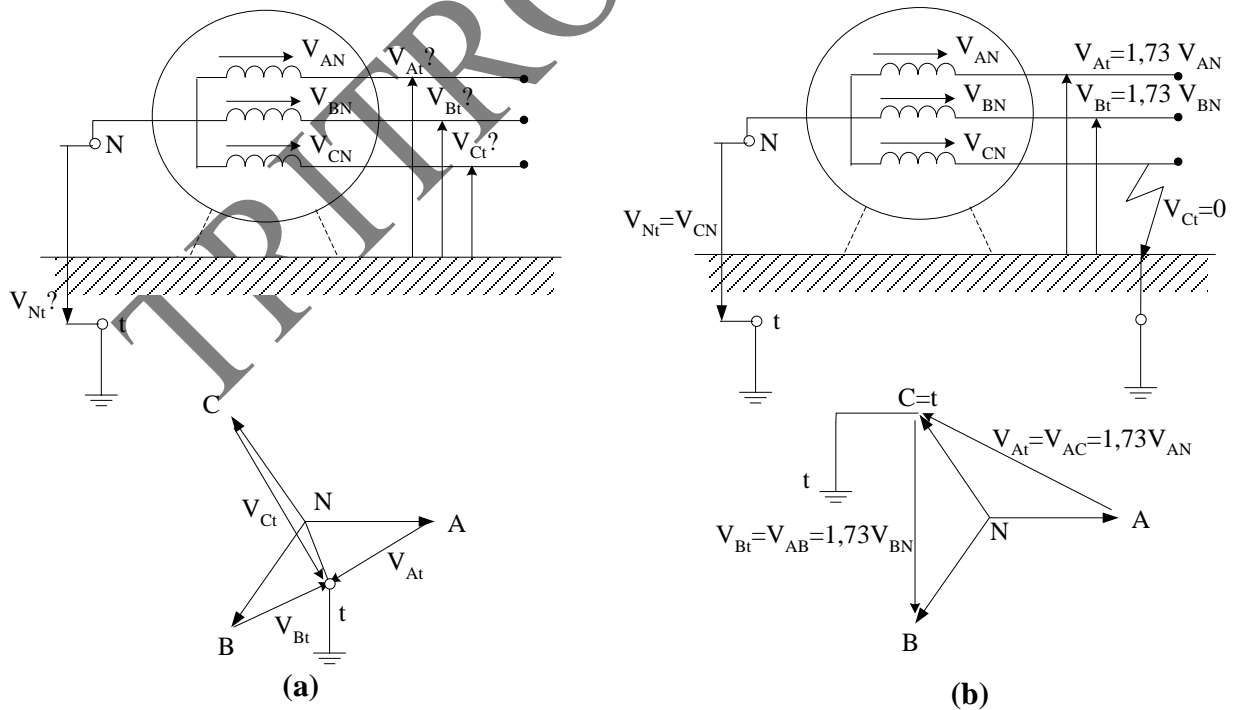


Fig. 4. Sistema eléctrico con neutro aislado y falla a tierra

Por el contrario, si se conecta el neutro a tierra, mediante un electrodo de puesta a tierra, con una resistencia despreciable, R_t (resistencia de circuito de falla), las tensiones fase-masa quedan fijadas a la magnitud de la tensión fase-neutro, $V_{ft}=V_{fN}$, incluso de producirse una falla monofásica tierra franca, por falla de la aislación, en alguna de las fases, como se muestra en la figura 5. La conexión a tierra del neutro permite reducir, sustantivamente, los espesores a las aislaciones, disminuyendo el costo de los sistemas eléctricos. La reducción en el costo es mayor cuanto más alta en la magnitud de la tensión nominal del sistema eléctrico.

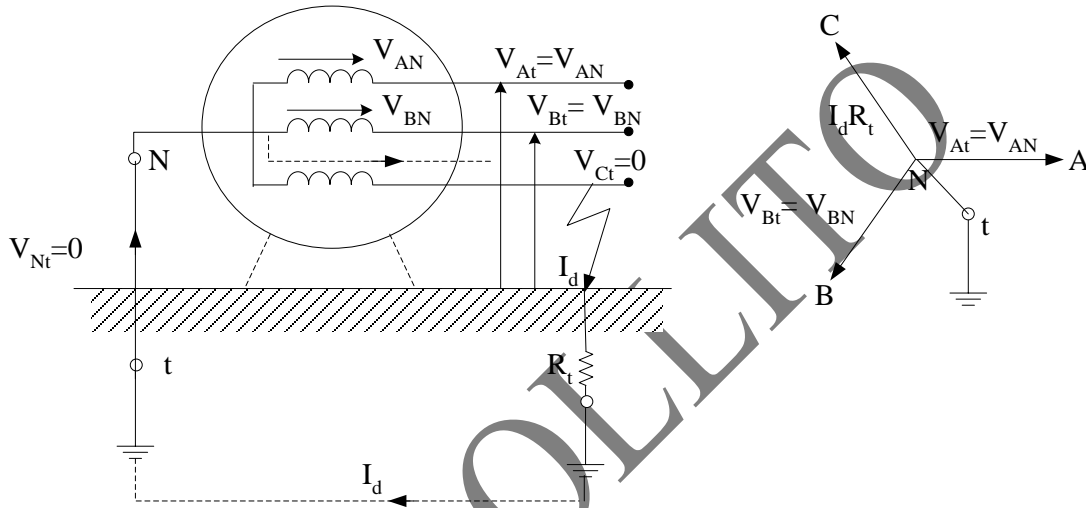


Fig. 5. Sistema eléctrico con neutro conectado a tierra y falla a tierra.

Sin embargo, en los sistemas con neutro conectados a tierra una falla a tierra causa corrientes residuales que determinan los lugares por donde circulan. No obstante, estas corrientes de tierra son fáciles de detectar y posibilitan la operación de los sistemas de protección residual.

En varios sistemas eléctricos se adopta una solución intermedia, que consiste en conectar el neutro a tierra, a través de una impedancia. Con esta configuración una falla en la aislación provoca magnitudes menores de corrientes de falla a tierra, que en un sistema con neutro conectado sólidamente a tierra y, sobretensiones más reducidas que en los sistemas con neutro aislado.

3.2. Masas puestas a tierra

En una instalación eléctrica con el neutro puesto a tierra si se produce una falla a tierra en una masa no puesta a tierra, la masa queda a una tensión, respecto de tierra, igual a la tensión fase-neutro, V_{fN} , ya que no circula ninguna corriente a tierra, como se aprecia en la figura 6.

Si la masa está puesta a tierra, la falla provoca una corriente de falla residual, I_d , que se muestra en la figura 7, dada por la expresión:

$$I_d = \frac{V_{fN}}{R_A + R_B + Z_{\text{Cond.}} + R_d} \approx \frac{V_{fN}}{R_A + R_B + R_d} \quad (7)$$

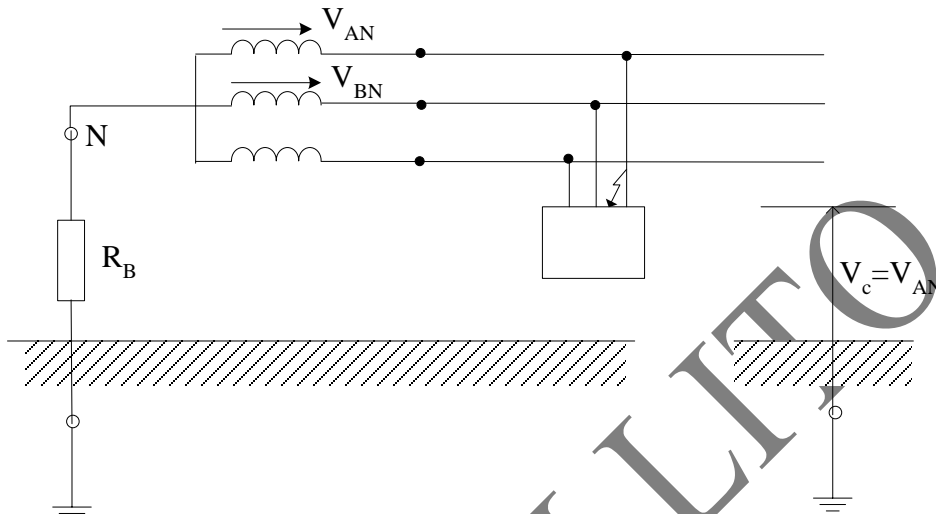


Fig. 6. Falla de aislación en una masa no puesta a tierra

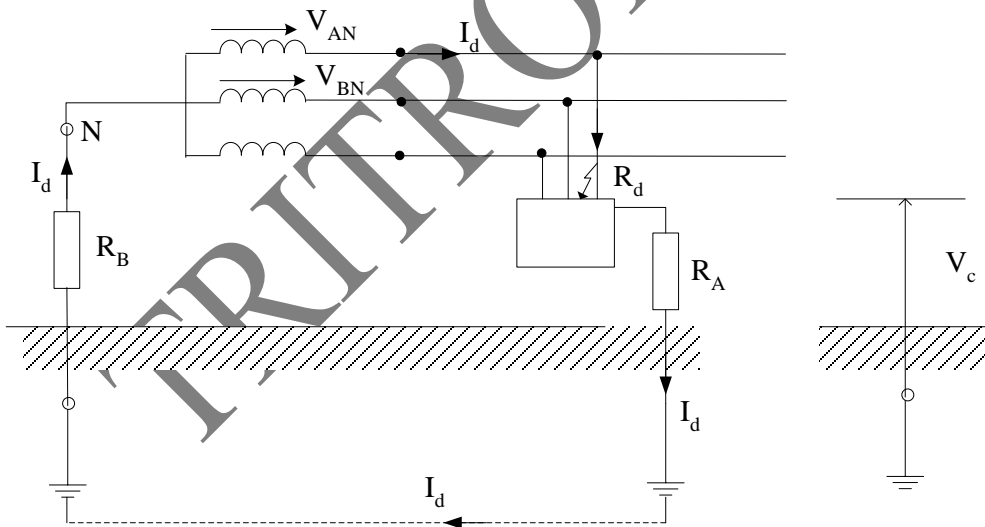


Fig. 7. Falla de aislación en una masa puesta a tierra

donde R_A es la resistencia de puesta a tierra de las masas, $1 \text{ Ohm} < R_A < 100 \text{ Ohm}$, R_B es la resistencia de puesta a tierra del neutro, $1 \text{ Ohm} < R_B < 10 \text{ Ohm}$ (En la II Región este valor es generalmente mayor), $Z_{\text{Cond.}}$ es la impedancia de los conductores recorridos por la corriente de tierra, del orden de los MOhm, y R_d es la resistencia de la aislación que se avería. La máxima de corriente por tierra en el caso de la falla de la aislación, se puede considerar a ésta despreciable, $R_d \approx 0$.



$$I_{dM\acute{a}x.} \approx \frac{V_{fN}}{R_A + R_B} \quad (8)$$

La máxima tensión de contacto que puede aparecer en la masa vale:

$$V'_c = I_{dM\acute{a}x.} R_A = \frac{V_{fN} R_A}{R_A + R_B} < V_{fN} \quad (9)$$

que siempre es menor que en el caso de estar la masa aislada de tierra. Además, la corriente de falla a tierra es fácilmente detectable y se usa para activar dispositivos de protección, diferencial, sobrecorriente, que desconectan la instalación de la red en cuanto se produce una avería en la aislación. Por todo esto la conexión de las masas a tierra se usan, con carácter casi generalizado en las instalaciones eléctricas.

3.3. Puesta a tierra de elementos de protección, supresor de sobretensiones, pararrayos y seccionadores de protección

En el caso de los supresores de sobretensión, pararrayos y seccionadores de protección, la puesta a tierra es indispensable que se realice de acuerdo con su función de protección.

La función de los supresores de sobretensión y los pararrayos, es facilitar las posibles descargas atmosféricas que afecten al sistema eléctrico y presentar un camino de baja impedancia entre las partes activas y tierra. Con ello se pretende evitar que se perfore la aislación, por causa de origen atmosférico y la aparición de diferencia de potenciales elevados en el terreno, que se origina si la corriente de la descarga a tierra se produce a través de elementos cuya resistencia de puesta a tierra no es suficientemente baja.

Los seccionadores de puesta a tierra ponen las partes activas del sistema eléctrico a potencial cero cuando quedan fuera de servicio, protegiendo al personal que procede a su revisión, frente a posibles cargas eléctricas acumuladas en los cables subterráneos o condensadores y, a retornos de tensión o reconexiones imprevistas.

4. Las puestas a tierra en el diseño de una planta industrial.

De forma general, en una planta industrial, con centro de transformación propio, pueden existir tres distintas instalaciones de puestas a tierra, con tres electrodos distintos, sin conexión eléctrica entre ellas, e independientes, donde el funcionamiento de cualquiera de ellas no afecte a las otras. Estas instalaciones, que se presentan de forma esquemática en la figura 8, son las siguientes.

- Puesta a tierra de las masas de baja tensión, R_A .
- Puesta a tierra del neutro del transformador, R_B .
- Puesta a tierra de las masas del transformador, R_T .

También se describe el sistema de puesta a tierra del neutro de la red de media tensión, R_N , que alimenta a la subestación de la planta industrial, aunque esta puesta a tierra no es parte de la instalación de la planta, sus características influyen en el diseño de la puesta a tierra de las masas de la subestación de la planta industrial.

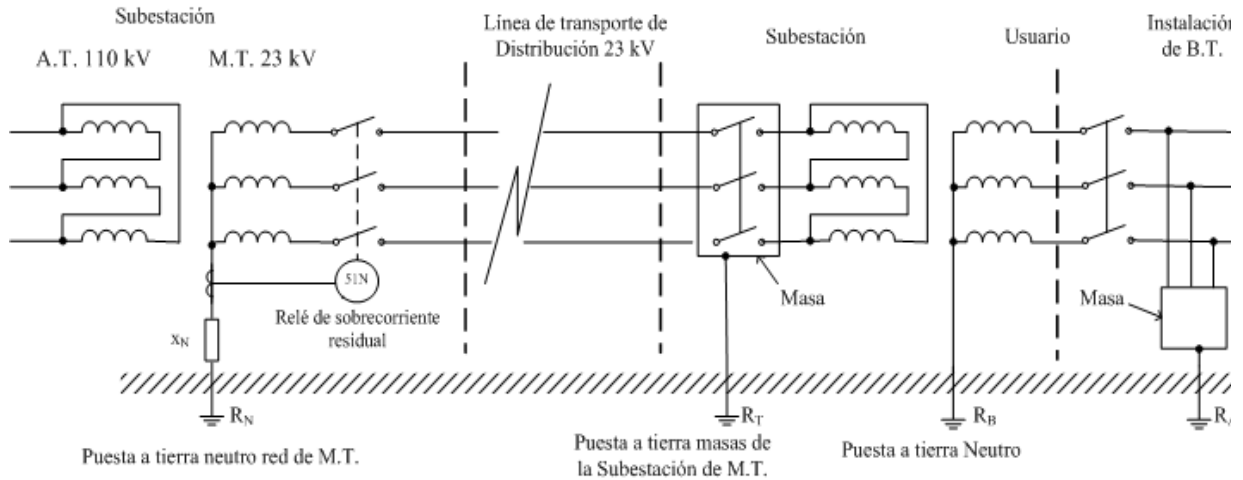


Fig. 8. Instalaciones de puestas a tierra a tener en cuenta en el diseño de una planta industrial

4.1. Puesta a tierra de las masas de B.T.

Este sistema de puesta a tierra tiene como objetivo la protección de las personas de la instalación de B.T., frente a la aparición de tensiones de contacto en las masas, producto de la avería en la aislación. El objetivo es minimizar las diferencias de tensión entre las distintas masas y, entre las masas y tierra, en caso de falla a tierra en algún punto de la instalación de B.T. Se conectan a este sistema de puesta a tierra todos los elementos ubicados en el recinto de la instalación que sean considerados masas, tales como:

- Cubiertas y carcasas metálicas de los aparatos eléctricos.
- Estructuras metálicas de edificios, soportes metálicos de protecciones.
- Canalizaciones metálicas, como agua, gas, calefacción, etc.
- Elementos metálicos próximos a las masas o parte activas.
- Armaduras metálicas de cables de B.T.

También pueden conectarse a este sistema de puestas a tierra algunos elementos de la instalación de B.T. que no son masas, como seccionadores de puestas a tierra y los secundarios de los transformadores de medición. De existir pararrayos o supresores de sobretensión, conectados a la red de B.T. éstos se conectan a un sistema de puesta a tierra propio, previsto para esta finalidad.

4.2. Puesta a tierra del neutro del transformador

En las instalaciones que se alimentan de una subestación, el neutro de éste puede ponerse a tierra usando un sistema propio.



4.3. Puesta a tierra de las masas de la subestación

En las instalaciones donde hay subestaciones todas las masas, situadas en el interior del mismo, incluida la cuba y el núcleo del transformador, los supresores de sobretensión instalados en las acometidas aéreas de M.T. y los secundarios de los transformadores de medición, deben ponerse a tierra, usando un sistema de puesta a tierra que, obligatoriamente, debe ser independiente del sistema de puesta a tierra de las masas de B.T.

Hay que tener en cuenta que una falla en la aislación de la subestación da lugar a tensiones de contacto en las masas del orden de los kV, durante el tiempo que tardan en operar las protecciones. Si las instalaciones de puestas a tierra de M.T y B.T. no fueran independientes, al producirse una falla en la aislación de la subestación, las elevadas tensiones de contacto aparecerán en las masas de la instalación de B.T., lo cual es inadmisibles.

Cuando se cumplen ciertas condiciones, de resistencia de puesta a tierra muy baja, es admisible unificar los sistemas de puestas a tierra del neutro del transformador con la puesta a tierra de las masas de media tensión, teniéndose una única instalación de puesta a tierra en la subestación.

4.3. Puesta a tierra del neutro de la red de M.T. que alimenta la subestación del usuario

Esta instalación de puesta a tierra se encuentra en el origen de la línea de M.T., en la subestación de la compañía distribuidora de energía eléctrica, que alimenta al transformador de la planta industrial.

Usualmente el neutro de las redes de distribución en A.T. se conecta a través de una reactancia, X_N , o resistencia, cuya finalidad es limitar la corriente de falla a tierra, I_d , en caso de fallar la aislación en la red de A.T. Sobre la conexión del neutro a tierra suele montarse un relé de sobre corriente que da la orden de desconexión cuando se detecta una corriente residual mayor o igual a la mínima de operación de la protección. El tiempo de operación del relé puede ser fijo o puede depender de la magnitud de la intensidad de corriente de tierra, disminuyendo al aumentar ésta.

En el caso más general para diseñar la puesta a tierra de las masas de M.T. es necesario conocer los datos, que debe dar la compañía distribuidora de energía eléctrica, siguientes:

- Valor de la resistencia o reactancia, X_N , limitadora de corriente.
- Valor de la resistencia de puesta a tierra del neutro de la red de alta tensión, R_N .
- Valor de la mínima corriente de operación del relé.
- Tiempo de operación o característica Corriente-Tiempo del relé sobrecorriente residual.



5 Características de la resistividad del terreno

Habitualmente en los cálculos de resistencias de puestas a tierra se considera al terreno como si fuese homogéneo y se usa el valor medio de la resistividad. Hecha esta aproximación, la resistividad del terreno depende de los factores siguientes:

- *Naturaleza del terreno.* En la Tabla 2 se muestran valores orientativos de resistividades volumétricas de terreno de distintas composiciones, incorporando suelos del desierto de Atacama, II Región de Chile. Se observa que, para cada tipo de suelo, la resistividad puede variar en un amplio margen, que depende de factores que se comentan a posterior de la Tabla 2.

Tabla 2. Valores orientativos de resistividad media de terreno de distintos tipos de suelo

Naturaleza del terreno	Resistividad volumétrica (Ohm-m)
Terreno pantanoso	De algunas unidades a 30
Limo	40 a 100
Humus	10 a 50
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silícea	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto, con césped	300 a 500
Suelo pedregoso	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Suelo desértico II Región, salitroso libre de humedad	10.000 a 900.000

- *Contenido en sales.* La conducción de la corriente eléctrica a través del suelo se realiza, principalmente, por medio del electrolito formado por las sales y la humedad que normalmente existe en el terreno. Cuanto mayor es el contenido en sales menor es la resistividad.
- *Humedad.* Cuanto mayor es la humedad en el suelo menor es su resistividad, ya que al aumentar el contenido en agua se favorece la formación de electrolito.
- *Temperatura del terreno.* Al aumentar la temperatura del suelo, crece la solubilidad de las sales y, por tanto, disminuye la resistividad. Cuando desciende la temperatura por debajo de cero grados la resistividad aumenta bruscamente, ya que la solubilidad de las sales, en el hielo es mucho menor que en el agua.
- *Estratigrafía.* En los terrenos estratificados, la resistividad puede variar sustancialmente al pasar de un estrato a otro de distinta composición. En estos casos los electrodos deben enterrarse a la profundidad que corresponda a la capa de menor resistividad.



- *Estacionalidad.* A lo largo del año, la variación de las condiciones climatológicas produce alteraciones en la humedad y temperatura del suelo, que se traducen en una variación cíclica, estacional, de la resistividad del terreno. La variación de la resistividad es más afectada en las capa superficiales, donde puede variar entre un ± 30 % de su valor medio, que en las capas profundas,

Las consideraciones anteriores ponen de manifiesto que el valor de la resistencia de una puesta a tierra, calculada por el método de usar valores de Tablas, está sometido a un considerable margen de error, debido a la incertidumbre introducida por la estimación de un valor medio.

La puesta a tierra calculada es un valor orientativo, que sirve para definir las dimensiones de los electrodos en la fase de diseño. El valor calculado debe ser mucho menor que el valor de la resistencia mínima requerida por la instalación, para así garantizar que incluso en las condiciones más desfavorables, terreno seco, bajas temperaturas, la resistencia de puesta a tierra tenga un valor aceptable.

Una vez construida la puesta a tierra se procederá a medir el valor real de la resistencia y, en caso de que la discrepancia, con el valor previsto sea excesivo se deberán tomar medidas correctivas, por ejemplo: añadir nuevos electrodos, mejorar el terreno.

5.1. Métodos de medición de resistividad de terreno

Quien no mida resistividad de terreno, en el lugar donde se va a construir una puesta a tierra, está apostando, ya que puede que le sirva o no, dado que la resistividad es un parámetro directamente involucrado con la puesta a tierra.

El número de mediciones debe ser mayor donde se presenten fuertes variaciones de resistividad, tanto verticales como horizontales. Se recomienda realizar mediciones en varios puntos en el terreno bajo estudio y en direcciones perpendiculares, con el objetivo de compararlas y así poder identificar las erróneas por presencia de objetos metálicos

En la normativa IEEE 81-1983 y ANSI/IEEE 80-1986, se presentan, en detalle, las técnicas de medición de resistividad de terreno siguientes:

- Arreglo tetraelectródico no rectilíneo
- Arreglo tetraelectródico rectilíneo.
- De A.L. Kinion.
- De Lee.
- De Palmer
- De Schlumberger modificado.
- De Schlumberger o del Gradiente.
- De Wenner o del Potencial.
- Dipolares (6).
- Por medida de resistencia, con método la Caída de Potencial, con técnica de Profundidad de un electrodo vertical, dR/dL .
- Por toma de muestras.

6. Corrosión en las puestas a tierra

Uno de los requisitos que deben cumplir los electrodos de puestas a tierra es soportar adecuadamente la corrosión, por el hecho de estar enterrados.

La corrosión galvánica se produce cuando dos metales diferentes están conectados eléctricamente e inmersos en un electrolito, conocido como efecto pila galvánica de corrosión, como se aprecia en la figura 9 (a).

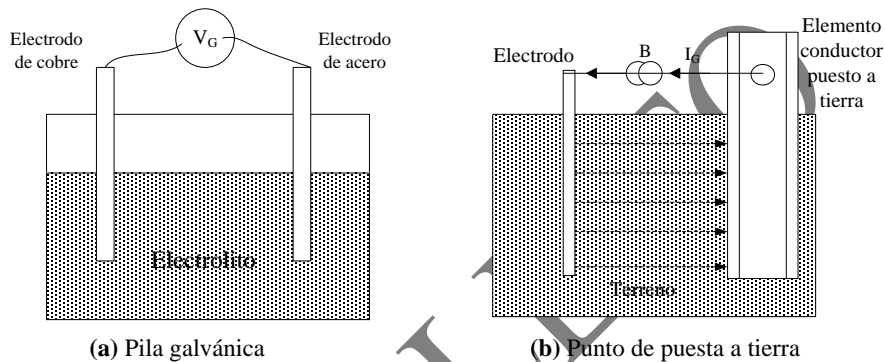


Fig. 9. Mecanismo de corrosión en los sistemas de puestas a tierra

En las instalaciones de puesta a tierra se pueden producir pilas galvánicas de corrosión cuando hay elementos metálicos enterrados en el terreno y conectados al sistema de puesta a tierra. Los dos metales, elemento metálico y el electrodo, actúan como ánodo y el otro como cátodo, el terreno constituye el electrolito, como aprecia en la figura 9 (b).

El acero enterrado se corroe por reacción electroquímica, con gran facilidad. Como este material es muy usado se debe evitar usar electrodos con materiales que causen corrosión galvánica al acero. El comportamiento frente a la corrosión de diferentes materiales es el siguiente:

- El Magnesio, zinc y el aluminio se corroen rápidamente al contacto con el acero, por lo que no son apropiados para ser usados como puestas a tierra.
- El cobre se corroe muy poco, pero, en contrapartida, crea graves problemas de corrosión al acero enterrado, siendo éste un aspecto a tener en cuenta, cuando se hace una puesta a tierra.
- El acero cuando no está protegido se corroe rápidamente, por lo que no es apto como electrodo de puesta a tierra.
- El cromo – níquel se corroe menos que el cobre y apenas influye en la corrosión del acero conectado a él, por lo que resulta un buen electrodo de puesta a tierra.
- El acero dulce, blindado con cromo – níquel se comporta como el material anterior, con la ventaja de ser más económico.



7. Técnicas de mejoramiento de las puestas a tierra

Cuando se cuenta con valores bajos de resistencia de puesta a tierra existen varias ventajas, entre ellas una mejor protección a las personas y los equipos. Dentro de las prácticas para lograr una decisión acertada en este parámetro se pueden nombrar las siguientes:

7.1. Instalación de contrapesos (electrodo horizontal) en las torres

Muchos autores, en el caso de las torres de transporte de energía eléctrica, recomiendan usarlos siempre de 30 m, otros de más de 100 m y, en la práctica se han visto hasta de kilómetros. Las puestas a tierra del tipo contrapeso no requieren longitudes extensas y son un buen procedimiento que puede drenar hasta el 80 % de la corriente de una descarga atmosférica. No obstante, dejan de ser efectivos si la verdadera conexión eléctrica con el terreno no es duradera o si son muy largas, 100 m.

7.2. Anillo alrededor de la torre

Práctica que recomienda el sector de las comunicaciones, pero con pobre respuesta ante las altas frecuencias. Estos anillos en cable o alambre se hacen como complemento a los contrapesos, pero su efectividad sigue estando ligada a la conexión efectiva con la tierra.

7.3. Mallas de puestas a tierra extensas

Se han usado en casos extremos con altos costos y gran dificultad. En el caso de las torres algunos artículos citan el hecho de haber construido mallas de puestas a tierra de 50 m x 50 m como solución.

7.4. Utilización de concretos especiales

El concreto húmedo se comporta, en esencia, como un electrolito, con una magnitud del orden de los 100 Ohm-m. Por otra parte, el concreto secado al horno presenta una resistividad de 10^9 Ohm-m, aproximadamente, lo que indica que es un buen aislante eléctrico. Este gran aumento en la resistividad, que logra el concreto al quitarle el agua, quiere decir la corriente eléctrica circula por el material húmedo, principalmente, por medios electrolíticos, es decir, mediante los iones que contiene el agua evaporable. Por lo tanto puede esperarse que cualquier aumento de agua y de iones presentes disminuya la resistividad de la pasta de cemento. A pesar de que la gran mayoría de los aditivos no reducen la resistividad del concreto de forma confiable y significativa, existen algunos eficaces para este propósito. Un caso, ya estudiado, para disminuir la resistencia del concreto es el agregado de negro de humo de acetileno, entre el 2 % al 3 % del peso del cemento.



7.5. Concretos conductivos

El concreto es una mezcla compuesta de cemento, arena, grava y agua. Cuando se construye una fundación de concreto reforzado los mecanismos de conducción eléctrica son electrolitos y arcos eléctricos con evidentes efectos de polarización. Todo lo indicado dice que si se supera una energía crítica se presentan daños en el concreto, por lo que toma relevancia la determinación de las densidades de corriente si, se desea puestas a tierra en el concreto. Se sabe que una densidad de corriente menor a 5 A/cm^2 no daña las fundaciones en el concreto, pero si excede los 15 A/cm^2 hay daño.

7.5.1. Electrodo en el concreto

Este sistema se conoce UFER y, consiste en introducir alambres largos de cobre, 10 m o más, en el interior del concreto armado, y unirlos al acero de refuerzo de la cimentación. Esta técnica fue desarrollada Herb G. Ufer, funcionario del ejército de los EEUU, durante la segunda guerra mundial, para los galpones de almacenamiento de bombas en Arizona, quien en 1942 ante al IEEE presentó resultados de 124 puestas a tierra, con resistencia de puestas a tierra menores a 5 Ohm, las que fueron medidas durante 18 años. Esta técnica hoy es complementaria a los contrapesos, es decir donde se monte una tierra UFER, deben ponerse contrapesos.

7.6. Electrodo químicos

Este tipo de electrodos son usados desde 1987. Son tubos perforados rellenos de sales, que han demostrado gran efectividad al comienzo, con corta vida útil.

7.7. Aditivos químicos de relleno o suelos artificiales

En algunas circunstancias, debido a la alta resistividad del terreno, principalmente en el desierto de Atacama, II Región de Chile, se requiere emplear materiales de relleno especiales o aditivos químicos. En estas situaciones se ponen alrededor del electrodo aditivos con la intención de reducir la resistividad del terreno en la vecindad de éste, lo que reduce su impedancia de puesta a tierra. La reducción de la impedancia de puesta a tierra depende, principalmente, del valor de la resistividad original del suelo, de su estructura y del tamaño del sistema de la puesta a tierra. El material de relleno debe ser no-corrosivo, de un tamaño de partícula relativamente pequeño y, que ayude a retener la humedad. En caso de que el material que se ha excavado es apropiado para el relleno, antes debe harnearse y después compactarse.

Algunos materiales de relleno, que reducen la resistividad del terreno en el entorno del electrodo, son los siguientes:



7.7.1. Bentonita

La bentonita sódica es alcalina, Ph de 10,5, aproximadamente. Absorbe casi cinco veces su peso en agua, reteniéndola, de esta forma se expande hasta treinta veces su volumen, aproximadamente. Estando en el terreno absorbe la humedad del suelo, mientras no se presenten fallas a tierra, ya que se torna hidrofóbica. Su resistividad con un 300 % de humedad es de 2,5 Ω -m, aproximadamente.

7.7.2. Carbón vegetal o mineral

Si bien el carbón mezclado con cloruro de sodio, sal, es de baja resistividad, lamentablemente, presenta el bajo pH, es decir es corrosivo, pero no permite bajar sustancialmente la resistencia de puesta a tierra, sobre todo por el tamaño de la partícula. Un carbón de partículas muy finas tiene una resistividad volumétrica de 1,8 Ω -m, aproximadamente.

7.7.3. Suelos artificiales.

Es la respuesta a la industria por la necesidad de obtener bajas resistencias de puestas a tierra. Existen varios productos, en distintos países, con diversos nombres comerciales como: Amelioterre, Aterragel, Backfill, Chem-rod, Conducrete, Earthron, Electrofiill, Elprex, Erico-Gel, Exogel, Favigel, Gal, Gap, Graf, Gem-25, KAM, Laborgel, Marconita, Mitronite, Parres, Polyrod, Power Fill, Quibacsol, Quibacfill, Sanick-gel, Sankosha, Stockosorb, Terracero, Terrafill, Thorgel, Vra, X-lit, **Tritrollito**, etc. Al respecto es importante aclarar que aun no existe una normalización internacional para especificar un suelo artificial.

8. Medición de resistencia de puesta a tierra

La tecnología actual establece, claramente, de que no hay artificio alguno que reemplace la medición directa de la resistencia de puesta a tierra. Estas mediciones además de ser muy importantes en la verificación de la efectividad de una puesta a tierra, recientemente construida o para confirmar cambios, como parte de una rutina de mantenimiento, requiere de un conocimiento especializado, por parte del responsable, para no tener accidentes o causar daños al equipamiento.

8.1. Métodos de medición de resistencia de puesta a tierra

Dentro de los métodos conocidos de medición de resistencia de puesta a tierra, se pueden nombrar los siguientes:



- De la curva de caída de potencial.
- De la regla del 62%.
- De la pendiente.
- De los cuatro potenciales o de Tagg.
- De la intersección de curvas.
- Del triángulo o de Nippold.
- Estrella triángulo.
- Por corriente inyectada.
- Por tensión inducida.
- Con referencia natural
- Selectivo.

8.1.1. Método de la curva de caída de potencial.

Se encuentra basado en obtener una curva como la mostrada en la figura 10. Si en una medición en terreno se entierra un electrodo de corriente (barra) a una distancia tal que quede fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra que se desea medir y luego se miden valores de resistencia variando la distancia del electrodo de tensión, se puede ver de que existe una zona plana de resistencia, equivalente a un valor fijo. Ese es el valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra.

Para que el método sea más sencillo se pueden hacer tres mediciones. Si se promedian éstas y el valor de cada una se encuentra en un error aceptable, por ejemplo un 5%, comparándola con el promedio, entonces, se puede dar este valor como oficial. Conocido el lado mayor de una puesta a tierra, se puede decir que una distancia, suficientemente lejana, para el electrodo de corriente, esté dentro 5 a 10 veces el lado mayor.

Cuando se determina el lado mayor de una puesta a tierra, que en una malla es la diagonal, o la profundidad en las barras, éste se multiplica por cinco y a esa distancia se clava o entierra el electrodo de corriente, distancia conocida como C. Luego se hacen las tres mediciones, se verifica que el error se encuentre por debajo del error previsto, determinándose que ese es el valor de la resistencia de la puesta a tierra. Ahora si los resultados no se encuentran dentro del error, se debe distanciar más el electrodo de corriente, ya que significa que la curva no presenta zona plana o de potencial. Si las distancias no permiten extenderse más, se debe aplicar otro método.

En zonas urbanas donde a veces no es posible enterrar barras para medir, se pueden usar placas, láminas o, incluso, una tela humedecida para poder hacer contacto con la tierra, siempre y cuando el óhmetro de tierra, sea de buena calidad. En la figura 11 se presenta, de forma esquemática, la forma de medir con el método curva de caída de potencial, en lugares donde no se puede enterrar barras.

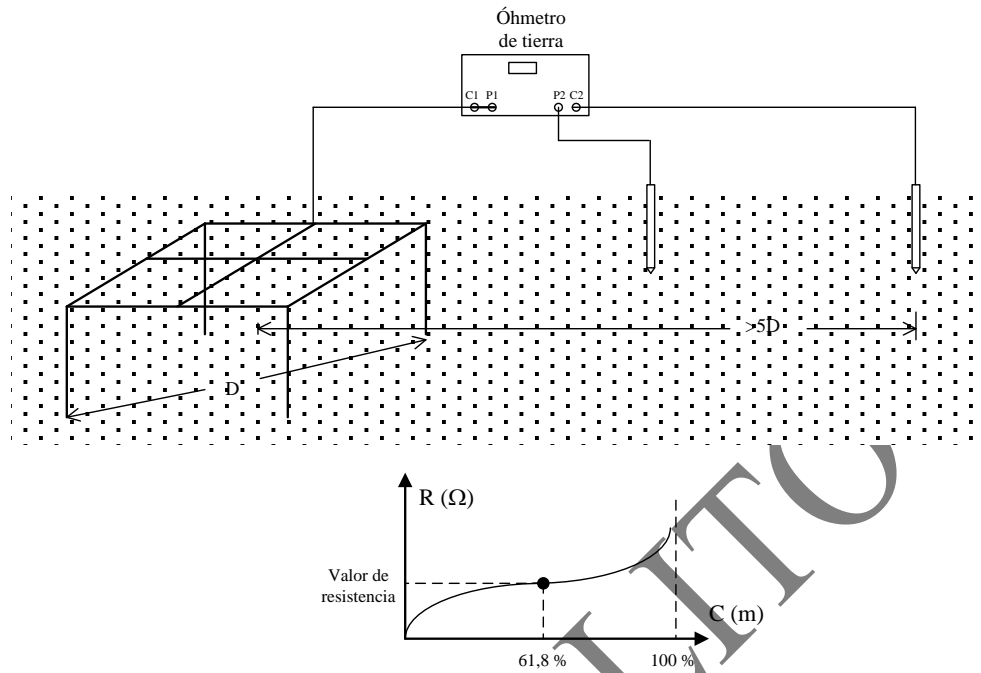


Fig. 10. Método de la curva de caída de potencial

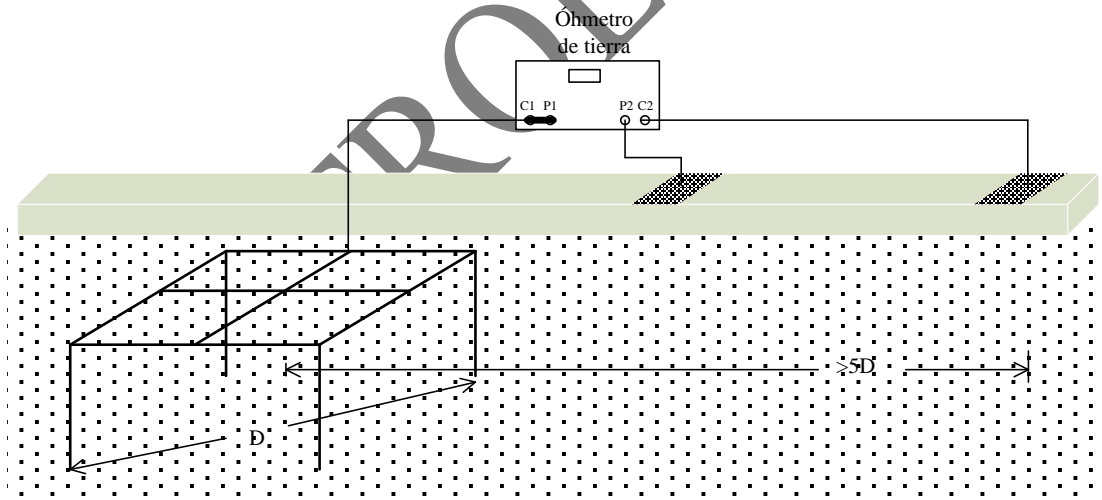


Fig. 11. Método de la curva de caída de potencial en zonas urbanas

8.1.2. Método de la regla del 62%

Este método fue desarrollado por G.F. Tagg y publicado el 12 de diciembre de 1964, en el Proceeding of Tech IEEE Vol. III. El autor infirma que las zonas de influencia de las puestas a tierra pueden ser tan grandes que para evitar la superposición de estas áreas, la persona que va a medir debe tomar distancias considerables entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra a medir. Es fundamental, en este método, que las áreas de influencia no se superpongan entre sí. Está basado en considerar a la puesta a tierra como una semiesfera.

Las distancias entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra deben ser entre tres a cinco veces, o más, el lado mayor de la puesta a tierra o su diámetro equivalente. La diferencia está en que el lugar donde se debe tomar el verdadero valor de la resistencia de puesta a tierra, es con el electrodo de tensión ubicado en la distancia de 0,618 veces C, respecto de la puesta a tierra.

En su libro “Earth Resistance”, Tagg, publica una tabla de valores de distancias de los electrodos de corriente y tensión que no siguen la regla del 62%, sino que introduce algunos valores más empíricos para usar, especialmente, en grandes sistemas de puestas a tierra.

8.1.3. Método de la pendiente

Este método, también, fue idea de Tagg, para ser aplicado en grandes sistemas de puestas a tierra, donde el centro eléctrico de la malla no está claramente definido, siendo sencillo, ya que basta con hacer las mediciones indicadas en la figura 12, proporcionando buenos resultados, no siendo tan vulnerable en suelos no homogéneos.

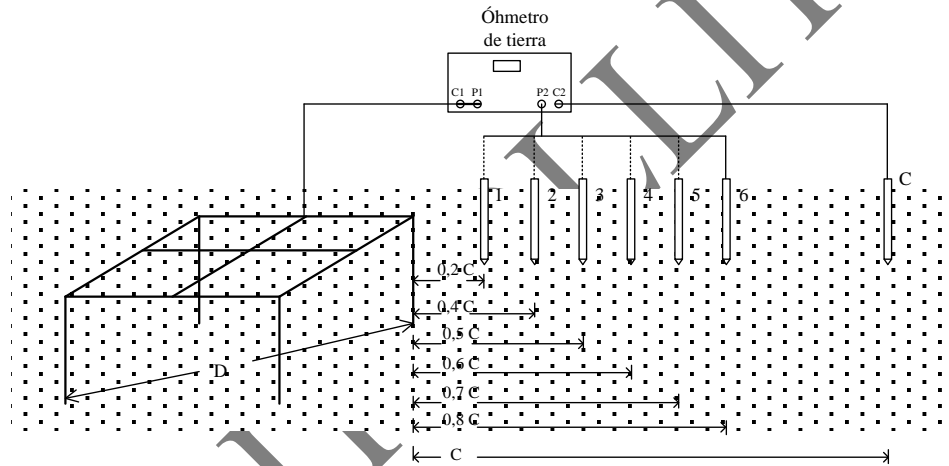


Fig. 12. Método de la pendiente

La secuencia de medición y cálculo es el siguiente:

1. Se mide el valor de la resistencia, con P2 en el 20%, 40% y 60% de la distancia C.
2. Considere R_1 , con P2 en el 20% de C.
3. Considere R_2 , con P2 en el 40% de C.
4. Considere R_3 , con P2 en el 60% de C.
5. Determine el coeficiente de pendiente, $\mu = \frac{(R_3 - R_2)}{(R_2 - R_1)}$
6. Según el valor de μ calculado, de la Tabla 3 encuentre el valor de k correspondiente.
7. Determine la magnitud de P_T , a través de: $P_T = k \cdot C$.
8. Clave o entierre el electrodo de tensión P2 en P_T .
9. Mida en esta nueva disposición la resistencia, la que debe ser el valor verdadero
10. Vuelva a realizar el proceso completo para otro valor mayor de C. Si el valor de resistencia verdadera disminuye apreciablemente, quiere decir que C debe aumentarse todavía más.



Tabla 3. Valores de k en función de m para el método de la pendiente

μ	k	μ	k	μ	k	μ	k	μ	k
0,01	0,6932	0,39	0,6446	0,77	0,5856	1,15	0,5071	1,53	0,3740
0,02	0,6921	0,40	0,6432	0,78	0,5838	1,16	0,5046	1,54	0,3668
0,03	0,6909	0,41	0,6418	0,79	0,5821	1,17	0,5020	1,55	0,3635
0,04	0,6898	0,42	0,6404	0,80	0,5803	1,18	0,4994	1,56	0,3580
0,05	0,6886	0,43	0,6390	0,81	0,5785	1,19	0,4968	1,57	0,3523
0,06	0,6874	0,44	0,6375	0,82	0,5767	1,20	0,4941	1,58	0,3465
0,07	0,6862	0,45	0,6361	0,83	0,5749	1,21	0,4914	1,59	0,4304
0,08	0,6850	0,46	0,6346	0,84	0,5731	1,22	0,4887	1,60	0,3342
0,09	0,6838	0,47	0,6331	0,85	0,5712	1,23	0,4859	1,61	0,3278
0,10	0,6826	0,48	0,6317	0,86	0,5693	1,24	0,4831	1,62	0,3211
0,11	0,6814	0,49	0,6302	0,87	0,5675	1,25	0,4802	1,63	0,3143
0,12	0,6801	0,50	0,6287	0,88	0,5656	1,26	0,4773	1,64	0,3071
0,13	0,6789	0,51	0,6272	0,89	0,5667	1,27	0,4743	1,65	0,2997
0,14	0,6777	0,52	0,6258	0,90	0,5618	1,28	0,4713	1,66	0,2920
0,15	0,6764	0,53	0,6243	0,91	0,5598	1,29	0,4683	1,67	0,2840
0,16	0,6752	0,54	0,6228	0,92	0,5579	1,30	0,4652	1,68	0,2758
0,17	0,6739	0,55	0,6212	0,93	0,5559	1,31	0,4620	1,69	0,2669
0,18	0,6727	0,56	0,6197	0,94	0,5539	1,32	0,4588	1,70	0,2578
0,19	0,6714	0,57	0,6182	0,95	0,5519	1,33	0,4556	1,71	0,2483
0,20	0,6701	0,58	0,6167	0,96	0,5499	1,34	0,4522	1,72	0,2383
0,21	0,6688	0,59	0,6151	0,97	0,5479	1,35	0,4489	1,73	0,2278
0,22	0,6675	0,60	0,6136	0,98	0,5458	1,36	0,4454	1,74	0,2167
0,23	0,6662	0,61	0,6120	0,99	0,5437	1,37	0,4419	1,75	0,2051
0,24	0,6649	0,62	0,6104	1,00	0,5416	1,38	0,4383	1,76	0,1928
0,25	0,6636	0,63	0,6088	1,01	0,5395	1,39	0,4346	1,77	0,1797
0,26	0,6623	0,64	0,6072	1,02	0,5373	1,40	0,4309	1,78	0,1658
0,27	0,6610	0,65	0,6056	1,03	0,5352	1,41	0,4271	1,79	0,1511
0,28	0,6597	0,66	0,6040	1,04	0,5330	1,42	0,4232	1,80	0,1352
0,29	0,6583	0,67	0,6024	1,05	0,5307	1,43	0,4192	1,81	0,1183
0,30	0,6570	0,68	0,6008	1,06	0,5285	1,44	0,4152	1,82	0,1000
0,31	0,6556	0,69	0,5991	1,07	0,5262	1,45	0,4111	1,83	0,0803
0,32	0,6543	0,70	0,5975	1,08	0,5239	1,46	0,4068	1,84	0,0588
0,33	0,6529	0,71	0,5958	1,09	0,5216	1,47	0,4025	1,85	0,0353
0,34	0,6516	0,72	0,5941	1,10	0,5193	1,48	0,3980		
0,35	0,6502	0,73	0,5924	1,11	0,5169	1,49	0,3935		
0,36	0,6488	0,74	0,5907	1,12	0,5144	1,50	0,3888		
0,37	0,6474	0,75	0,5890	1,13	0,5121	1,51	0,3840		
0,38	0,6460	0,76	0,5873	1,14	0,5096	1,52	0,3791		

8.1.4. Método de la intersección de curvas

Este método, también, se desarrolló para puestas a tierra de gran tamaño, más de 20.000 m², resolviendo varios inconvenientes, por un lado, ya no exige ubicar el electrodo de corriente a distancias considerables, elimina dudas sobre las influencias mutuas entre los electrodos y no obliga a determinar un centro eléctrico. Consiste en obtener varias curvas de resistencia de dispersión y diferentes posiciones del centro eléctrico, por medio de un procedimiento eléctrico se obtiene la verdadera resistencia de puesta a tierra.

El procedimiento del método consiste en:

1. Se debe seleccionar una distancia C , para el electrodo de corriente tomando una serie de mediciones de resistencias en cada X_i entre el 0% y 90% de C ,
2. Se selecciona otra distancia C en la misma dirección y se repite el procedimiento.
3. En cada X_i se calcula la posición del electrodo de potencial, con la ecuación siguiente:

$$P_i = 0,62(C + X_i) - X_i \quad (10)$$

4. En cada P_i tomar el valor de R_i , graficar R_i en función de X_i .
5. En el punto de intersección de las curvas $R_i = f(X_i)$ se puede leer el valor oficial de resistencia de puesta a tierra. Si se hacen más curvas más exacta será la solución.

En la figura 13 se presenta una gráfica con tres curvas de mediciones de resistencia en función de X_i .

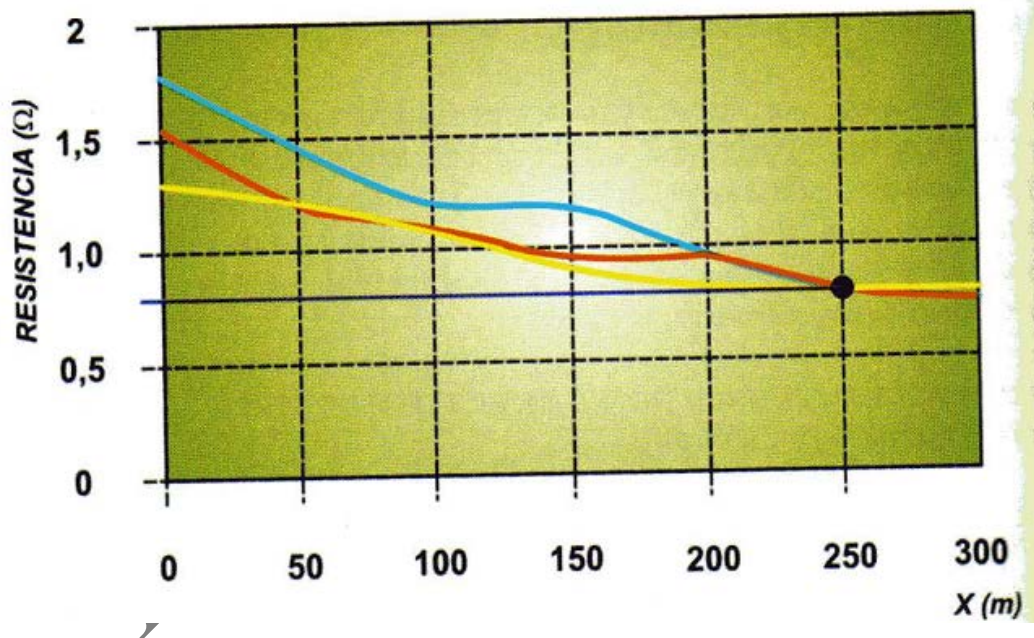


Fig. 13. Intersección de las curvas

8.2. Resumen comparativo de los métodos de mediciones de resistencias de puestas a tierra

En la Tabla 4 se presentan las ventajas, desventajas y observaciones de los métodos usados en la medición de resistencias de puestas a tierra.



Tabla 4. Resumen que compara los métodos usados en medir resistencias de puestas a tierra

Método	Lugar de aplicación	Ventajas	Desventajas	Observaciones
Curva de caída de potencial	En puestas a tierra pequeñas o más complejas, si se hace la curva completa	Es de fácil comprensión. Exige pocos cálculos	En puestas a tierra grandes, exige extensas longitudes de cable	Es un método didáctico. Las curvas de las gráficas sirven para aplicar otros métodos
Regla del 62%	En puestas a tierra de cualquier tamaño	Es simple y rápida de aplicar	Requiere saber del centro eléctrico. Exige grandes distancias	Es el método más aplicado
De los cuatro potenciales	En puestas a tierra de tamaño mediano y grande	No se necesita determinar el centro eléctrico	Exige grandes distancias. Requiere de bastantes cálculos	Es un método que se usa poco. Se aceptan los resultados cuando se consideran grandes distancias
Intersección de curvas	En grandes puestas a tierra como en las S/E de potencia	Permite menores distancias, que los métodos anteriores	Necesita más cálculos y gráficas	Es un método que ahorra distancias y permite determinar el valor de la resistencia, donde otros, por falta de espacio, no lo pueden hacer
De la pendiente	En grandes puestas a tierra, como en las subestaciones	Es más gráfico, con pocos cálculos	Debe tenerse más cuidado al usarse en suelos no homogéneos	Se puede usar combinado, con el de intersección de curvas, como verificación
Estrella triángulo	En pequeñas puestas a tierra, en locales urbanos	No requiere distancias largas	Necesita bastantes cálculos, siendo alto el error con distancias pequeñas	Se debe usar cuando los métodos convencionales no se pueden aplicar, usándose en áreas urbanas
Inyección de corriente	En subestaciones grandes o terrenos de alta resistividad	Se garantiza una alta intensidad de corriente	Se requiere de un grupo portátil o una fuente de energía eléctrica distante	Pueden haber interferencias con otros sistemas de energía eléctrica de baja frecuencia
Tensión inducida	En puestas a tierra de un solo electrodo	Es solución en casos donde el error no es vital	Presenta errores grandes cuando existen corrientes de desequilibrio	Son tenazas diseñadas para lazos de tierra. Sólo se usan como una aproximación
De referencia natural	Uso, en último caso, por persona calificada	Resuelve el inconveniente de que siempre es posible medir	Puede confundir si el resultado no es confiable	Se pueden cometer grandes errores, debiéndose usar sólo si otro método no se puede usar
Selectivo o de cuatro tenazas	En torres de transporte de energía eléctrica	No se necesita desconectar el cable de guardia	Alto costo	No está normado. Puede no funcionar el suelos con alta resistividad



8.3. Medición de resistencias de puestas a tierra de torres de transporte de energía eléctrica de alta tensión

La medición de la resistencia de puesta a tierra de una torre de transporte de energía eléctrica de una línea aérea, por los métodos convencionales, es complicada, dado que las torres se encuentran eléctricamente, unidas a través del cable de guardia; lo que realmente se mide es el sistema formado por todas las puestas a tierra, que se encuentran conectadas en paralelo. Por lo tanto, el valor que se obtiene es pequeño, más si no se tiene en cuenta las áreas de influencia, no representando el verdadero estado de una puesta a tierra, en particular.

Un método correcto, para medir la resistencia de puesta a tierra de una torre, consiste en desconectar el cable de guardia, mantenerlo aislado, preocuparse de la magnitud de la tensión que existe en el punto donde se instala el electrodo de potencial. Como esta operación se hace, la mayoría de las veces con la línea energizada, resulta ser una tarea compleja, costosa y de alto riesgo. Incluso con la línea desenergizada o fuera de servicio es un trabajo lento y tedioso.

Existen en el comercio óhmetros de tierra de 5 kHz y 25 KHz que ofrece una solución integral, pero en el desierto de Atacama no son capaces de entregar suficiente intensidad de corriente, por lo que ellos no miden de forma directa.

A la alta frecuencia empleada, la reactancia inductiva del cable de guardia, en un vano de extensión normal, es alta, con lo que permite minimizar el efecto de las puestas a tierra de las torres adyacentes, a la que se está midiendo. El instrumento sólo mide la resistencia de puesta a tierra de la torre considerada, incluyendo la cimentación, de manera que la magnitud leída representa el comportamiento, frente a una onda de impulso, como una descarga atmosférica, aproximadamente.

En el método convencional, si bien para medir la resistencia de puesta a tierra de una torre, hay que aislar el cable de guardia, la influencia de las tensiones en el suelo o residuales, depende de su magnitud relativa. Generalmente las tensiones residuales tienen una magnitud y ángulo de fase que varía en el tiempo. Esta variación se produce con mayor o menor velocidad, dependiendo del origen y de las características del sistema eléctrico.

Una manera de minimizar el efecto de las tensiones residuales consiste en inyectar corriente de medición de una magnitud tal que las tensiones medidas sean mayores que las residuales. A veces esto no es posible, producto de que la intensidad de corriente es limitada por la resistencia del electrodo de corriente y la disponibilidad de tensión, que se resuelve incrementándola. En la figura 14 se presenta un circuito utilizado para medir puestas a tierra de torres energizadas.

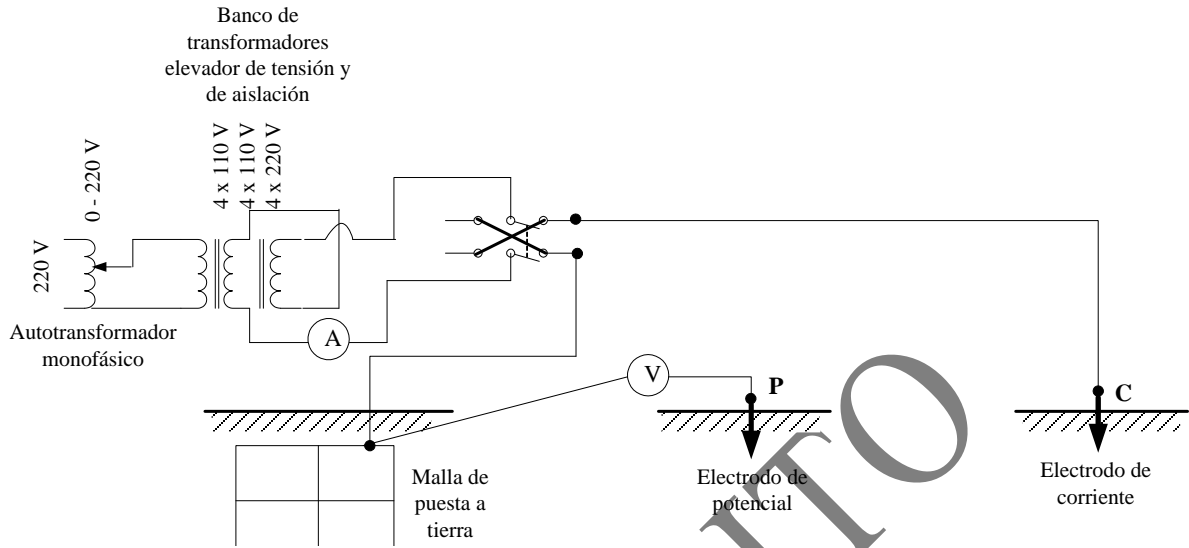


Fig. 14. Circuito de medición de resistencia de puesta a tierra energizada, con inyección de corriente

9. Medición de tensiones de paso y de contacto

Una vez construida la instalación se debe verificar que las tensiones de paso y de contacto se encuentren dentro de los límites que se admiten.

Esto significa que antes de poner en servicio, se tienen que medir las tensiones de contacto y de paso, aplicadas, V_{ca} y V_{pa} , respectivamente, en los puntos que se consideren más desfavorables y comprobar si se cumplen las restricciones siguientes:

$$V_{pa} \leq V_{pa,admissible} = \frac{10K}{t^n} \quad (11)$$

$$V_{ca} \leq V_{ca,admissible} = \frac{K}{t^n} \quad (12)$$

donde t es el tiempo de duración de la falla y K y n son constantes dadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Constantes K y n , para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto admisibles

t (s)	K	n
$0,9 \geq t > 0,1$	72	1
$3 \geq t > 0,9$	78,5	0,18
$5 \geq t > 3$	64	0
$t > 5$	50	0

Hay que tener en cuenta de que, en el proceso de cálculo de la instalación, el criterio que se usa es el indicado en el punto 2.5.

Sin embargo, una vez que la instalación ya está montada, las magnitudes que se miden son las tensiones de paso y de contacto aplicadas, y a partir de ellas se decide si la puesta a tierra es correcta desde el punto de vista de la seguridad de las personas.

9.1. Medición de las tensiones de paso aplicadas

En la figura 15 se presenta, de forma esquemática, la manera de medir las tensiones de paso. Básicamente el ensayo consiste en inyectar una intensidad de corriente de prueba, I_p , por la puesta a tierra que se desea medir. El voltímetro mide la tensión entre dos electrodos, V , que representan los pies, separados a 1 m, que están conectados mediante una resistencia $R_k=1.000 \text{ Ohm}$, que simula al cuerpo humano y, situado en el lugar donde se quiere medir la tensión de paso aplicada.

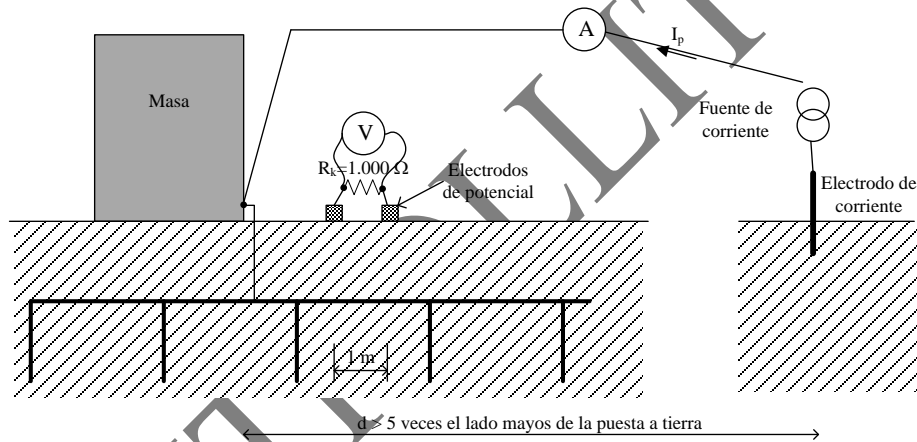


Fig. 15. Medición de tensiones de paso aplicadas

La tensión de paso aplicada se determina de la expresión:

$$V_{pa} = V \frac{I_{cc1\phi}}{I_p} \quad (13)$$

donde $I_{cc1\phi}$ es la corriente de falla monofásica a tierra, considerando la resistencia de la puesta a tierra. Para inyectar la corriente de prueba, I_p , se necesita un electrodo de corriente, suficientemente alejado de la puesta a tierra que se mide, para evitar que se altere la distribución de los potenciales de la puesta a tierra que se ensaya (áreas de influencia). En la práctica se aconseja distanciarse entre 3 a 5 veces el lado mayor de la puesta a tierra.. También se puede usar como electrodo de corriente la puesta a tierra de otra instalación, siempre que la distancia sea la adecuada. La mayoría de las normas, dicen que la corriente de prueba, I_p , debe ser como mínimo el 1% de la corriente de falla monofásica a tierra, no siendo menor a 50 A (por tiempo corto), en centrales y subestaciones y a 5 A en sistemas de distribución.

En la II Región de Chile es complicado poder cumplir con el requisito de la I_p , debido a que la resistividad de terreno es muy alta, lo que limita demasiado la corriente de prueba.

Para los electrodos de potencial se especifican las condiciones siguientes:

- Cada electrodo de potencial debe tener una superficie de contacto, con el terreno, de 200 cm^2 .
- La fuerza mínima que ejercen sobre el terreno cada uno de los electrodos de potencial debe ser de 250 Newtons, 25 kg

Antes de comenzar las mediciones debe impedirse la permanencia o paso de personas o animales por la zona de influencia de los electrodos de tierra, ya que de ser la resistencia de puesta a tierra alta, pueden aparecer diferencias de tensión peligrosas en el terreno

9.2. Medición de las tensiones de contacto aplicadas

El ensayo de medición de tensión de contacto aplicada, entre una masa y tierra, mostrado en la figura 16, es análogo al del punto 9.1, con las diferencias siguientes:

- ✓ Los electrodos de prueba de potencial están separados a 20 cm y, conectados eléctricamente, entre sí.
- ✓ Los electrodos deben ubicarse a 1 m de la parte metálica, cuya tensión de contacto aplicada se quiere medir, conectados, a este elemento, a través de una resistencia de 1.000 Ohm.

En estas condiciones se inyecta la intensidad de corriente de prueba, I_p , en la puesta a tierra que se ensaya.

La tensión de contacto aplicada se determina de la lectura que se hace en el voltímetro de alta impedancia, V , que se conecta entre los electrodos y la masa, a través de la ecuación siguiente:

$$V_{ca} = V \frac{I_{cc1\phi}}{I_p} \quad (14)$$

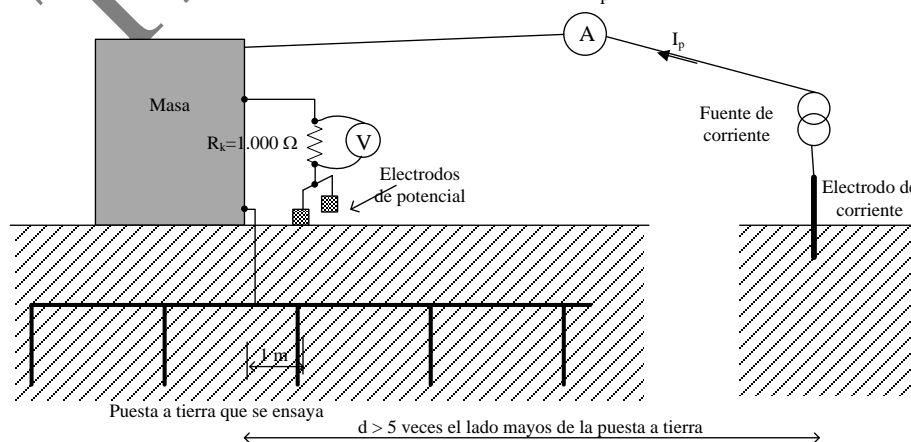


Fig. 16. Medición de tensiones de contacto aplicadas



Las especificaciones para la intensidad de corriente de prueba y los electrodos de potencial son las mismas que en el caso de la tensión de paso aplicada.

10. Bibliografía

- [1] Norma NCh Elec. 4/2003. “Electricidad, Instalaciones de consumos en baja tensión.
- [2] ANSI/IEEE Std 81, 1983, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground Systems”
- [3] ANSI/IEEE Std 80, 1986 and 2000 "Guide for safety in AC substations grounding"
- [4] P. Ortuondo, “Manual para proyecto y análisis de puestas a tierra”, Edición propia, 1997
- [5] Procobre Chile. Unidad 4. “Sistemas de puestas a tierra”. 1998.
- [6] Favio Casas O. “Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica”. Editorial Icontec. 2008.
- [7] J. Roger F., M. Riera G., C. Roldán P. “Tecnología Eléctrica”. 2da Edición. Editorial Síntesis. 2007.
- [8] Procobre Chile. “Mallas de tierra”. 1999.
- [9] NEC, National Electric Code Handbook. Mac Graw Hill. 1997.

Hugo E. Martínez D. (1953) Es Dr. Ingeniero Industrial, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, por la Universidad Politécnica de Madrid, España. Tiene el grado de Magister en Ingeniería Eléctrica, por la Universidad de Chile. Es Ingeniero de Ejecución y Civil Electricista, por la Universidad Técnica del Estado de Chile. Sus áreas de interés son los Sistemas de puestas a tierra y la Contaminación de los aisladores de líneas aéreas de Alta Tensión. Es profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antofagasta, Chile, desde el año 1978.