

MANUAL PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA

1. Introducción

Los Sistemas de Conexión a Tierra (SCT) son parte indispensable de las instalaciones eléctricas, sean éstas de potencia, comunicaciones, medición o instrumentación. Uno de los parámetros característicos de los SCT es la denominada *Resistencia a Tierra*. Este valor es un indicador, aunque no concluyente, del adecuado funcionamiento del SCT.

Los SCT pueden ser tan simples como una barra enterrada verticalmente, un conductor desnudo enterrado horizontalmente, o complejos y extensos formados por mallas hecha de conductores horizontales algunas veces combinada con la inserción de barras verticales. Uno de los factores que determinan la complejidad de un SCT es la resistividad del terreno, su estructura geológica superficial y el máximo valor de resistencia a tierra permitido.

2. El Concepto de Resistencia a Tierra

Generalmente el concepto de resistencia se asocia al de un elemento con dos terminales claramente definidos, que permiten su conexión eléctrica dentro de un circuito o red. En el caso de un SCT solo se dispone de un terminal: el punto de conexión al terreno mediante el SCT. Si se considera el terreno donde está el SCT como un plano infinito, el otro terminal de la resistencia queda indeterminado. En la práctica este no es el caso, ya que para poder medir la resistencia se debe inyectar corriente al SCT formando un circuito cerrado para el retorno de la corriente.

Aunque la estructura física de un SCT consta generalmente de barras verticales y conductores horizontales, el concepto de resistencia a tierra se comprende mejor considerando la forma de electrodo de conexión más sencilla de estudiar teóricamente: un electrodo hemisférico enterrado a ras del suelo, ver figura 1.

Para fines de cálculo se asumirá al terreno como un medio conductor semi-infinito homogéneo con resistividad ρ . La resistividad del material del electrodo se considera mucho menor que la del terreno. Debido a la simetría del electrodo la corriente se distribuye uniformemente sobre la superficie del mismo.

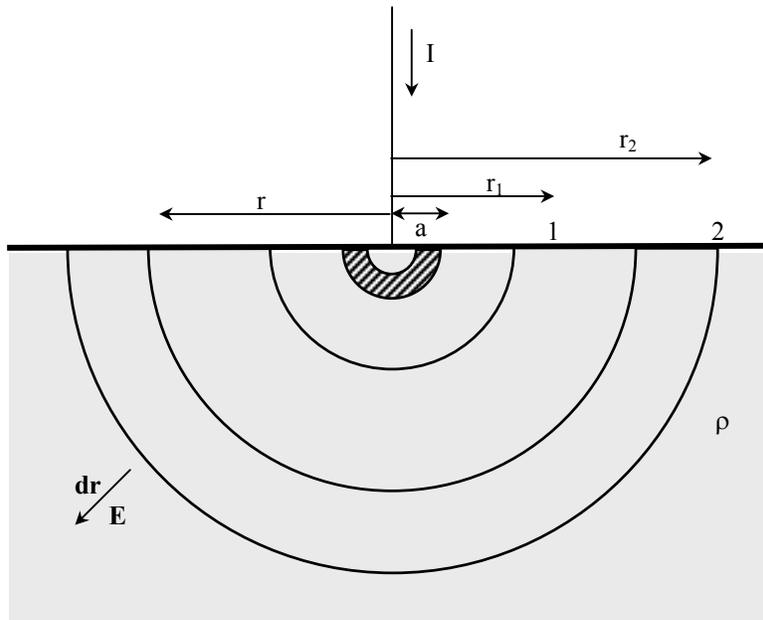


FIG. 1 Electrodo hemisférico de radio a

Si se inyecta una corriente I por el centro del electrodo, el módulo de la densidad de corriente a una distancia r será:

$$J = \frac{I}{2\pi.r^2} \quad (1)$$

Debido a la simetría del problema el vector densidad de corriente \mathbf{J} en coordenadas esféricas tiene dirección radial perpendicular a la superficie del electrodo. Aplicando la ley de Ohm en su forma puntual el módulo del vector campo eléctrico será:

$$E = \frac{\rho.I}{2\pi.r^2} \quad (2)$$

También el vector campo eléctrico \mathbf{E} tendrá dirección radial.

La diferencia de potencial entre dos puntos 1 y 2 sobre la superficie del terreno ubicados a distancias r_1 y r_2 del centro del electrodo, se puede calcular integrando al vector campo eléctrico a lo largo de un camino que una los puntos 1 y 2, es decir:

$$V_{12} = \int_1^2 \mathbf{E}.d\mathbf{r} \quad (3)$$

Escogiendo un camino radial sobre la superficie del terreno desde 1 hasta 2, los vectores \mathbf{E} y $d\mathbf{r}$ son paralelos a lo largo de este camino. En consecuencia el producto escalar dentro de la integral se reduce al producto de los módulos de los vectores mencionados.

$$V_{12} = \rho \int_1^2 \frac{I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right\} \quad (4)$$

Las superficies equipotenciales dentro del terreno son superficies hemisféricas con centro coincidente con el del electrodo hemisférico. Si en la expresión (4) se hace que $r_2 \rightarrow \infty$ solamente queda el potencial del punto 1 respecto a una referencia ubicada en el infinito, es decir $V_1 = \rho \cdot I / (2\pi r_1)$. En consecuencia todos los puntos ubicados a una distancia r_1 tendrán el mismo potencial respecto a ese punto remoto. Para $r = a$ se obtiene el potencial del electrodo respecto a un punto ubicado a una distancia muy grande, teóricamente en el infinito, es decir:

$$V_a = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (5)$$

Obviamente de (5) se puede obtener un valor de resistencia definido como la relación:

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (6)$$

La corriente I inyectada en el electrodo de conexión a tierra, se puede considerar como si fuera inyectada por una fuente de voltaje conectada entre el electrodo y un punto de referencia de potencial cero. La utilización de un punto remoto ubicado a una distancia infinita permite la definición (6) y ubicar el retorno de la corriente inyectada I . Estas consideraciones no son válidas en los casos reales donde no se puede conseguir distancia infinita. Sin embargo desde el punto de vista práctico sí es posible obviar esta limitación como se verá mas adelante.

3. Resistencia mutua entre electrodos de conexión a tierra

Sean dos electrodos hemisféricos A y B de radios a y b respectivamente, enterrados a ras del suelo y separados una distancia D como se muestra en la figura 2.

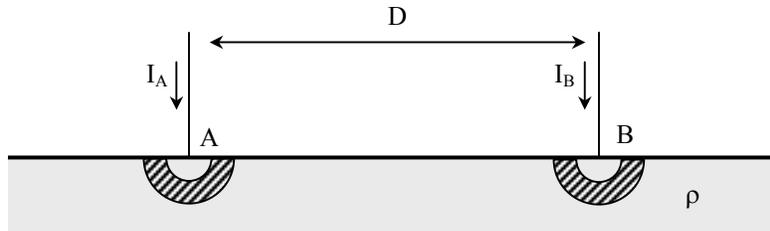


FIG. 2 Electrodos hemisféricos de radios a y b

Si la distancia D es mucho mayor que los radios de los electrodos, se puede considerar sin mucho error que las corrientes I_A e I_B se distribuyen uniformemente, lo que permite aplicar el principio de superposición. Si $I_B = 0$ e $I_A \neq 0$ el voltaje del electrodo B respecto a un punto remoto está determinado por la siguiente expresión:

$$V_B = \frac{\rho \cdot I_A}{2\pi \cdot D} \quad (7)$$

La relación V_B/I_A es una relación de resistencia:

$$R_{AB} = \frac{\rho}{2\pi \cdot D} \quad (8)$$

Esta relación se denomina resistencia mutua entre los electrodos A y B. Si la corriente I_A se hace igual a 1,0 la resistencia mutua será el voltaje medido en el electrodo B respecto a un punto remoto. El caso general cuando I_A e I_B son diferentes de cero, el voltaje en cada electrodo respecto a una referencia remota se puede obtener mediante el principio de superposición:

$$V_A = \frac{\rho \cdot I_A}{2\pi \cdot a} + \frac{\rho \cdot I_B}{2\pi \cdot D} \quad (9)$$

$$V_B = \frac{\rho \cdot I_A}{2\pi \cdot D} + \frac{\rho \cdot I_B}{2\pi \cdot b} \quad (10)$$

Mediante la teoría de matrices (9) y (10) se pueden escribir como una sola ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{AA} & R_{AB} \\ R_{BA} & R_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde:

$$R_{AA} = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} \quad ; \quad R_{AB} = R_{BA} = \frac{\rho}{2\pi \cdot D} \quad ; \quad R_{BB} = \frac{\rho}{2\pi \cdot b} \quad (12)$$

La ecuación (11) indica que si los electrodos funcionan interconectados o están muy próximos uno del otro, la resistencia a tierra de cada electrodo no puede definirse de la misma forma que para un electrodo aislado. En el caso de electrodos interconectados es posible encontrar un valor de resistencia equivalente del conjunto. Cualquiera que sea la situación, cada electrodo estará influenciado por la presencia del otro electrodo a través de la resistencia mutua entre ambos. Solo cuando la distancia D es muy grande el efecto mutuo se puede considerar despreciable. Teóricamente nulo cuando $D \rightarrow \infty$.

4. Perfiles de voltaje

Particularizando la expresión (4) cuando $r_2 \rightarrow \infty$ el potencial respecto a una referencia remota en un punto ubicado a una distancia r del electrodo está dado por:

$$V(r) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (13)$$

Lo que indica que el potencial decrece asintóticamente con la distancia r . La gráfica del potencial calculado según (13) en función de r corresponde a la curva en trazo continuo mostrada en la figura 3.

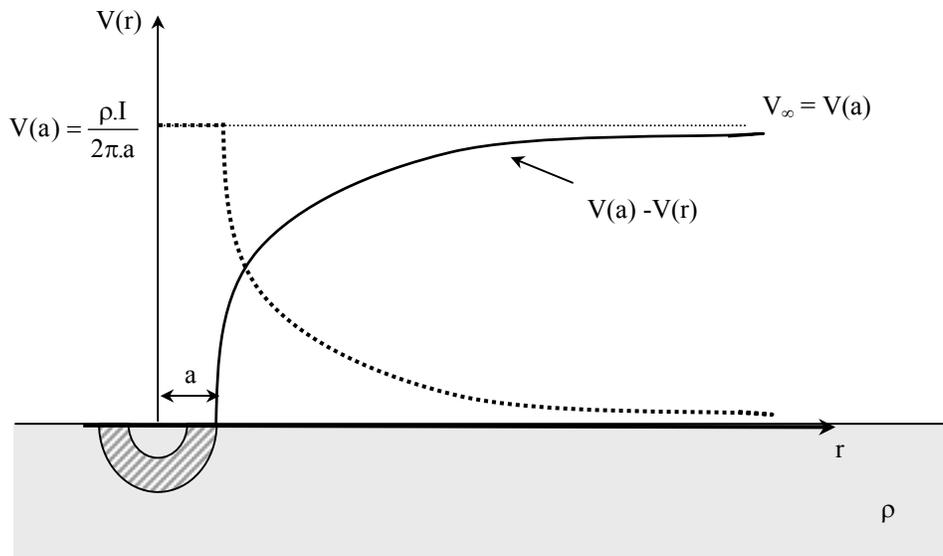


FIG. 3 Perfil de voltajes de un electrodo hemisférico

El perfil de voltaje de la figura 3 permite tener una idea gráfica de la variación del voltaje en diferentes puntos del terreno, especialmente en aquellos ubicados en la superficie del terreno. Esto es importante al momento de definir los denominados *Voltaje de Paso* y *Voltaje de Contacto*. Una forma alterna del perfil de voltaje es medir el potencial o voltaje respecto al electrodo. Esto se ilustra mediante la curva continua de la figura 3. Como la referencia es el electrodo, el voltaje arranca desde el valor cero para $0 \leq r \leq a$, incrementándose en la medida que r se incrementa. En el caso particular del electrodo hemisférico, debido a la simetría del problema el perfil de voltaje será igual al mostrado en la figura 3, independiente de la dirección tomada. Los lugares geométricos de los puntos equipotenciales sobre la superficie del terreno son circunferencias concéntricas con el electrodo, ver figura 4.

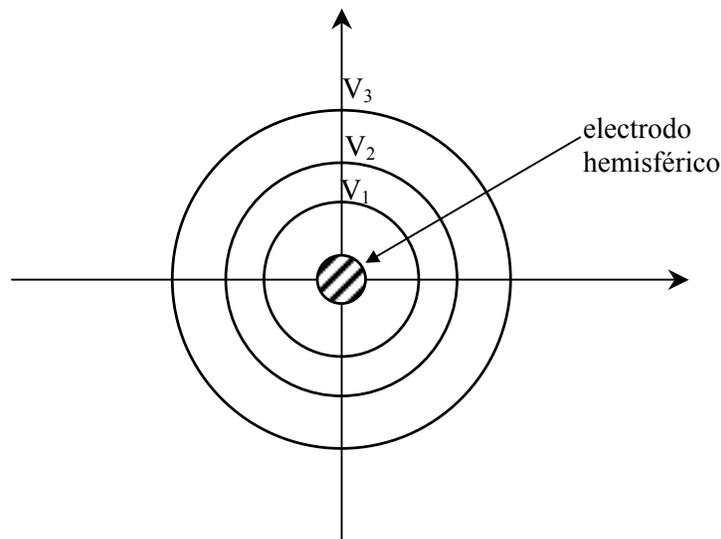


FIG. 4 Puntos equipotenciales en la superficie del terreno
($V_1 > V_2 > V_3$)

5. Medición de la resistencia a tierra

Una vez que se construye un sistema de conexión a tierra, debe medirse la resistencia del mismo con la finalidad de comprobar que cumple con los valores exigidos. Por otro lado al verificar la integridad de un sistema de conexión a tierra, la resistencia a tierra es un indicador de cuan efectivo está el sistema para el retorno de las corrientes de falla. La prueba de medición de la resistencia a tierra no da información alguna sobre la seguridad que pueda ofrecer un SCT bajo una condición de falla, especialmente con referencia a los voltajes peligrosos que puedan aparecer en la superficie del terreno. Aún cuando el valor de la resistencia a tierra esté por debajo de los valores requeridos, puede darse el caso de que no cumpla con los límites de voltajes permitidos para la seguridad del personal y los equipos [5]. En resumen:

; UN BAJO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA NO GARANTIZA LA SEGURIDAD DEL PERSONAL EN EL TERRENO SOBRE EL SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA O EN SUS INMEDIACIONES ;

Finalmente debido a los cambios que puedan ocurrir en el terreno y con fines de mantenimiento preventivo, se hace necesario medir periódicamente la resistencia a tierra para garantizar la adecuada conexión al terreno.

6. Método de la caída de potencial

El método mas utilizado para la medición de la resistencia a tierra es el denominado: "Método de la Caída de Potencial". Este método requiere dos electrodos auxiliares, una fuente de voltaje, voltímetro y amperímetro. La disposición y conexión de los equipos se muestra en la figura 5.

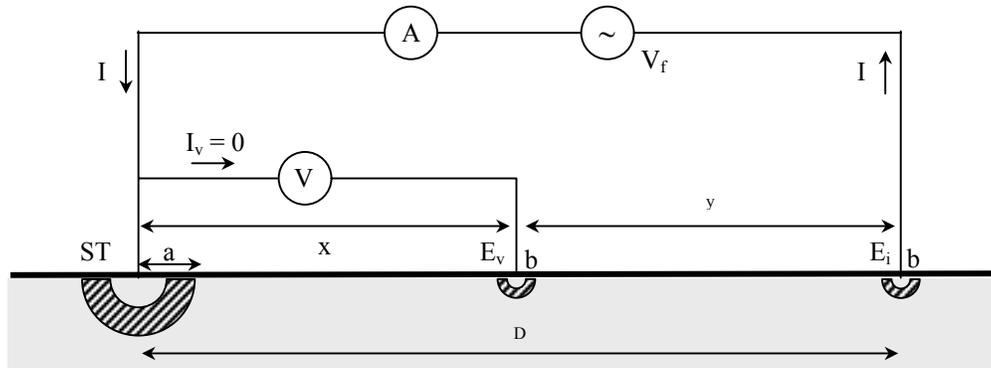


FIG. 5 Método de la caída de potencial

Con referencia a la figura 5:

ST: Sistema de conexión a tierra al cual se le va a medir la resistencia

E_v : Electrodo auxiliar de voltaje

E_i : Electrodo auxiliar de corriente

V: voltímetro

A: Amperímetro

V_f : Fuente de alimentación

La resistencia a tierra del sistema ST está representada por la relación entre el voltaje medido en un punto remoto, teóricamente a una distancia infinita de ST, y la corriente inyectada I. En la realidad ubicar un punto a una distancia infinita de ST es imposible. Sin embargo para fines prácticos, y dentro del rango de exactitud de los instrumentos, es posible aproximarse al valor de voltaje V_∞ del sistema ST, que representa el voltaje de ST respecto a una referencia remota, ver figura 3.

Para analizar el método de medición se recurre nuevamente a los electrodos hemisféricos enterrados en un terreno homogéneo, y asumiendo que la distancia entre ellos es mucho mayor que sus radios. La impedancia interna del voltímetro se considera de un valor elevado de tal forma que $I_v \ll I$. Por lo tanto el efecto de I_v sobre la medición se puede considerar despreciable. El sistema de conexión a tierra ST es un electrodo hemisférico de radio a , y los electrodos auxiliares E_v , E_i tienen radio b . Se asume que $a \gg b$.

Bajo estas condiciones el voltaje medido por el voltímetro V será la diferencia de potencial entre ST y E_v . El voltaje respecto a una referencia remota de cada uno de estos electrodos es:

$$V_{ST} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot a} - \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot D} \quad (14)$$

$$V_{EV} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot x} - \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot y} \quad (15)$$

El voltaje medido por el voltímetro es:

$$V = V_{ST} - V_{EV} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left\{ \frac{1}{a} - \frac{1}{D} - \frac{1}{x} + \frac{1}{y} \right\} \quad (16)$$

La resistencia medida será:

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} - \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{D} + \frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right\} \quad (17)$$

Se conoce que el valor verdadero de la resistencia del sistema ST está determinada por:

$$R_v = \frac{\pi}{2\pi \cdot a} \quad (18)$$

El factor que se sustrae del valor verdadero en la resistencia medida R_m en (17), es el error cometido en la medición. De esta forma el valor medido se puede expresar como la suma algebraica de dos factores: el valor verdadero R_v , y el error cometido en la medición R_e debido a la influencia del electrodo auxiliar de corriente E_i .

$$R_m = R_v - R_e \quad (19)$$

Si por algún medio se consigue anular R_e , el valor medido será igual al valor verdadero. Un primer análisis de la expresión (17) permite concluir que en la medida que las distancias D , x , y se incrementan, el valor medido se aproxima más al valor verdadero.

7. Regla del 61,8 %

El valor verdadero de la resistencia a tierra también puede obtenerse a partir de la resistencia medida si se encuentran las relaciones entre los valores x , y , D que anulen el error cometido, es decir:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{D} + \frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right\} = 0 \quad (20)$$

De (20) se obtiene que para anular R_e debe cumplirse:

$$x \cdot y + D \cdot y - D \cdot x = 0 \quad (21)$$

Si los electrodos E_v y E_i están alineados se cumple que:

$$D = x + y \quad (22)$$

Despejando y de (22) y sustituyendo en (21) se obtiene la siguiente ecuación:

$$x^2 + D \cdot x - D^2 = 0 \quad (23)$$

Ecuación que tiene como solución $x = 0,618 \cdot D$ y $x = -1,618 \cdot D$. Esto significa que ubicando el electrodo auxiliar E_v a una distancia del 61,8 % de la distancia D , la resistencia medida es igual al valor verdadero de la resistencia del sistema ST. La solución negativa de x no tiene interpretación dentro del contexto de ubicación de los electrodos: $D = x+y$.

8. El perfil de voltaje en la medición con el método de la caída de potencial

El voltímetro ubicado como se indica en la figura 5, mide la diferencia de voltaje entre ST y el punto donde se conecta el electrodo auxiliar E_v . Para diferentes puntos intermedios alineados entre ST y el electrodo auxiliar de corriente E_i , el voltaje medido es originado por la superposición del perfil de voltaje del sistema ST y el correspondiente al electrodo E_i . Esto da como resultado una curva de variación de voltaje similar a la que se indica en la figura 6(a).

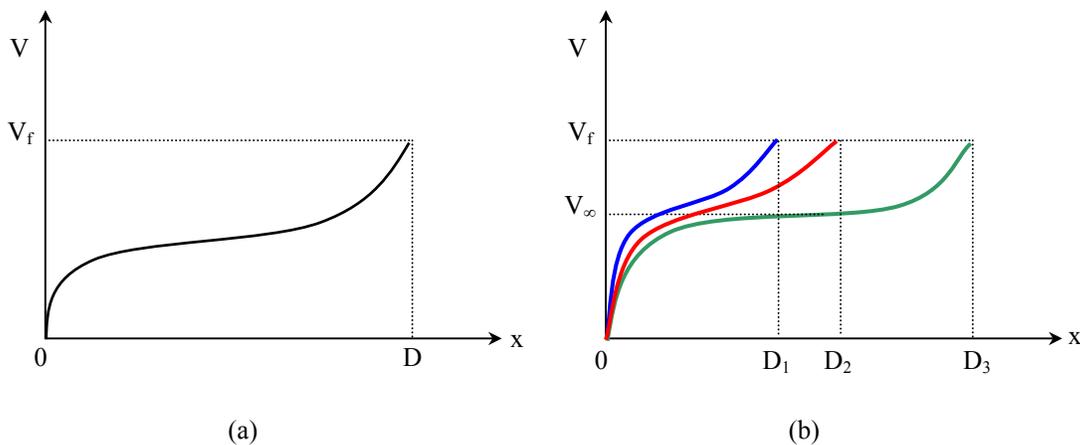


FIG. 6 Perfil de voltaje asociado al método de la caída de potencial

Para distancia D_i mayores, figura 6(b) $D_1 < D_2 < D_3$, el perfil tiende a aplanarse en la parte intermedia, esto es lo que se conoce como *zona de mínima pendiente*. En esta zona se considera que el voltaje medido es muy próximo al voltaje teórico V_∞ . Este es el valor que se utiliza para obtener la medida de la resistencia a tierra. La zona comprendida entre $x = 0$ y el inicio de la zona de mínima pendiente se conoce como la *zona de influencia* del sistema de conexión a tierra ST.

Si $D \gg a$ y $D \gg b$, la corriente inyectada es aproximadamente constante, la división del voltaje medido entre la corriente da como resultado una curva similar, pero multiplicada por el factor $1/I$ y en unidades de resistencia. Debido a esto, es común encontrar en los manuales de los fabricantes de aparatos para medir resistencia a tierra un perfil de resistencia en lugar del perfil de voltaje.

9. Aparatos para la medición de la resistencia a tierra

Algunos fabricantes han desarrollado aparatos tipo puente para medir directamente la resistencia de los SCT. Estos aparatos tienen su principio en el método de la caída de potencial y trabajan con circuitos similares al que se muestra en la figura.

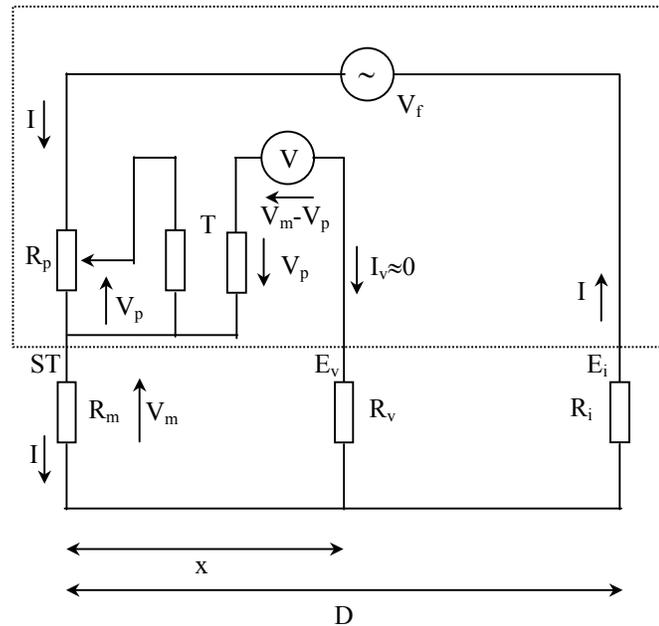


FIG. 5 Circuito simplificado de un aparato tipo puente

En la figura 7 los valores R_m , R_v , R_i representan respectivamente la resistencia medida del SCT bajo prueba (ST), la resistencia a tierra que presenta el electrodo auxiliar de voltaje E_v , y la del electrodo auxiliar de corriente E_i . Para limitar la medición a valores de resistencia pura la fuente V_f debe ser de corriente continua. Sin embargo la aplicación de corriente continua no es recomendable debido al efecto electroquímico que puede aparecer en el terreno y que puede alterar la medición. Para evitar este efecto, se utilizan fuentes de corriente continua que cambia su polaridad cíclicamente a una frecuencia baja, diferente de 60 Hz.

En el circuito de la figura 5 la fuente inyecta una corriente I , ésta produce una diferencia de potencial V_p en el potenciómetro R_p , y una diferencia de potencial V_m en el SCT bajo prueba. Mediante el transformador T se cambia la polaridad del voltaje V_p . El voltímetro V de cero central mide la diferencia de voltaje $V_m - V_p$. Se asume que $I_v \ll I$. Cuando R_p es igual a R_m el voltímetro tiene deflexión nula. A raíz de la evolución de la tecnología de aparatos electrónicos, actualmente se consiguen aparatos de medición digitales que pueden utilizar otro principio de medición interno. Sin embargo al método de la caída de potencial prevalece para la medición de resistencia a tierra.

10. Procedimiento y recomendaciones para la medición de resistencia a tierra mediante el método de la caída de potencial

El procedimiento recomendado es el siguiente:

1) Desconecte el SCT a probar de todos los equipos que generalmente se conecta a él: cables de guarda, neutro de transformadores, pantallas de cables, estructuras metálicas de soporte de equipos, circuitos de medición y control, y cualquier instalación que pudiere conectarlo con otros SCT cercanos o remotos. El objetivo de desconectar el SCT bajo prueba de posibles vías de conexión con otros SCT, es con la finalidad de medir en forma independiente la resistencia a tierra del SCT en cuestión. Algunos autores [10] consideran que la resistencia de un SCT debe medirse como funciona en la práctica, es decir con todos los equipos conectados a él en operación normal, ya que es la resistencia de todo el conjunto la que se va a presentar al momento de ocurrir una falla. Al respecto el argumento para medir la resistencia a tierra del SCT aislado, es garantizar que el SCT solo al momento de la falla presenta un camino de baja resistencia, ya que algunas veces no se puede prever la conexión de todos los equipos que deberían conectarse a un SCT en particular.

En casos excepcionales de terrenos de elevada resistividad, es muy difícil y costoso obtener un camino de baja resistencia con un SCT aislado. En estos casos se opta por interconectar SCT relativamente cercanos, con el fin de poder alcanzar el valor de resistencia a tierra deseado. Aquí se debe medir el conjunto, ya que se garantiza la interconexión de los SCT como estado normal de funcionamiento.

2) Ubique el electrodo auxiliar de corriente E_i a una distancia D adecuada del SCT bajo prueba. Como regla general se recomienda $D \geq 10.L$, siendo L la dimensión mayor del SCT[5].

3) Con el electrodo auxiliar de voltaje E_v proceda a medir sobre una dirección escogida, conectándolo al terreno en diferentes puntos intermedios entre el SCT y el electrodo auxiliar de corriente. Se recomienda que el espaciamiento entre los puntos de ubicación de E_v sea uniforme, para facilitar el trazado posterior de la curva de resistencia medida R_m en función de la distancia x entre el SCT y el electrodo E_v . Es aconsejable hacer una medición aplicando la regla del 61,8 %, o si se conoce la estratificación del terreno, a la distancia requerida para hacer el error nulo, ver numeral 11. Generalmente las mediciones se hacen sobre la misma dirección del electrodo auxiliar de corriente E_i . Sin embargo si las dimensiones del SCT bajo prueba son grandes, la distancia de ubicación de E_i puede ser considerable, del orden de los km, y la resistencia a medir muy baja ($< 1\Omega$). En estos casos ubicar la dirección de medición de voltaje coincidiendo con la de E_i hace que el acoplamiento electromagnético entre los conductores de conexión de los electrodos auxiliares sea máximo, pudiéndose afectar apreciablemente el valor medido[9]. En estos casos se recomienda, si es posible, que la dirección de medición de E_v sea perpendicular a la de E_i , con el fin de minimizar el error introducido por el acoplamiento electromagnético entre los conductores de conexión. Para más información ver apéndice A.

4) Dibuje la curva de resistencia medida R_m en función de la distancia x . Si la curva tiene una pendiente pronunciada, curvas con D_1 , D_2 , de la figura 6, incremente la distancia D en un 50 % o más y repita el proceso de medición. El resultado es satisfactorio cuando se consigue una curva con una zona intermedia de baja pendiente, casi nula, similar a la curva con D_3 de la figura 6. Especial cuidado debe tenerse al momento de escoger las escalas para el trazado de la curva. Escalas muy pequeñas en el eje horizontal magnifican la sensación de una curva de alta pendiente. Escalas grandes en el eje vertical magnifican las discrepancias propias de la medición de campo, mostrando una curva aparentemente errática no confiable. En caso de duda en la curva trazada, se recomienda ampliar la escala horizontal y reducir la vertical.

5) Si el sitio de ubicación del SCT lo permite, ubique el electrodo E_i en diferentes direcciones y repita la medición. Evite direcciones paralelas a líneas o circuitos energizados, ya que el acoplamiento electromagnético entre estos y los conductores de conexión de los electrodos auxiliares puede afectar la medición.

6) Si no se detecta deflexión alguna en el aparato de medición, aparatos analógicos, revise las conexiones de los electrodos auxiliares y el SCT. Si las conexiones están correctas se tiene un problema de sensibilidad por dos razones posibles: la corriente inyectada por el aparato es muy baja, y/o el contacto entre el electrodo auxiliar de voltaje y el terreno no es adecuada. La solución para este problema es humedecer con agua el punto de conexión de los electrodos auxiliares al terreno. Los aparatos digitales generalmente tienen señales de alarma indicando que la resistencia a tierra de los electrodos auxiliares supera el máximo valor previsto por el fabricante para garantizar una lectura confiable. La solución es la indicada anteriormente. Si aún persiste el problema conecte varios electrodos auxiliares de corriente en paralelo con la finalidad de incrementar la corriente inyectada por el aparato.

Los problemas de sensibilidad son típicos de terrenos de elevada resistividad. Si con las mejoras señaladas no se puede hacer una medición satisfactoria, se debe estudiar la posibilidad de utilizar como electrodo auxiliar de corriente el SCT de una instalación cercana. Otra alternativa es utilizar una fuente de voltaje exterior que permita inyectar una corriente adecuada para medir voltajes apreciables por los instrumentos disponibles. Es necesario el uso de voltímetros de alta impedancia, no se recomienda el uso de multímetros convencionales (multitester). Dependiendo del valor de corriente inyectada se requiere la adopción de medidas de seguridad para evitar accidentes por choque eléctrico, debido a los voltajes que aparecen en el SCT y en los electrodos auxiliares.

7) Si la lectura del aparato, analógico o digital, oscila sin encontrar un punto de equilibrio o lectura fija, esto significa que existe una señal de ruido o parásita de la misma frecuencia que la corriente inyectada por el aparato. Si la oscilación no es pronunciada se puede interpolar entre los valores extremos de la lectura. Este problema es típico de sitios con equipos generadores de armónicos: equipos de soldadura por arco, hornos eléctricos de arco, equipos electrónicos, grupos rectificadores etc. Si la oscilación de la lectura es de tal magnitud que la medición se hace imposible, una alternativa es inyectar un valor de corriente adecuado mediante una fuente exterior, con la finalidad de medir corrientes y voltajes mayores que los originados por la señal parásita. Algo que puede aliviar este tipo

de interferencia es ubicar los electrodos auxiliares lo mas alejados posible de los equipos generadores de interferencia.

8) Es posible que la medición esté fuera del rango del aparato. Cuando esto ocurra revise las conexiones, un mal contacto eléctrico puede alterar la medición completamente. Si todo está correctamente conectado y se presume que el aparato está operando adecuadamente, se puede aceptar que la resistencia a medir es muy elevada. Con los nuevos aparatos digitales la posibilidad de un contacto eléctrico abierto se indica con una señal de alarma.

9) Cuando se requiere medir la resistencia de SCT de grandes dimensiones, el equipo tradicional de medición puede resultar inadecuado. Generalmente estos SCT corresponden a patios de salida de plantas de generación o grandes subestaciones de interconexión. En estos casos la resistencia a medir es muy baja ($<1\Omega$). La medición debe prever el efecto del acoplamiento electromagnético entre los conductores de conexión de los electrodos auxiliares. La distancia de ubicación del electrodo auxiliar de corriente puede llegar a ser del orden de kilómetros. Es posible utilizar como electrodo auxiliar de corriente el SCT de una subestación remota interconectada mediante una línea de transmisión a la subestación bajo prueba. Los SCT de industrias también caen dentro de este tipo de casos. En las industrias además de la conexión a tierra propia de la acometida, en alta o baja tensión, el SCT lo conforman las tuberías y estructuras metálicas en contacto con el terreno conectadas intencionalmente o no al SCT de la acometida. Esto trae como consecuencia que aparte del punto de conexión a tierra en la acometida, existan puntos de conexión a tierra diseminados por toda el área que ocupa una fábrica en particular. Aquí lo recomendable es ubicar los electrodos auxiliares fuera de la instalación industrial, si es posible.

10) Para medir la resistencia tierra de SCT de torres de líneas de transmisión con cables de guarda éstos deben desconectarse de la torre bajo prueba. Si se dejan conectados se estará midiendo la resistencia de todos los SCT de cada torre de la línea conectadas en paralelo mediante el cable de guarda. Existen en el mercado aparatos que permiten hacer las mediciones individuales de cada torre sin necesidad de desconectar el cable de guarda.

11. Interpretación de resultados

El resultado obtenido de la medición hecha con el método de la caída de potencial es la curva de los valores medidos R_m en función de la separación del electrodo auxiliar de voltaje del SCT bajo prueba, distancia x . La curva obtenida es similar a la que se muestra en la figura 8, previsto que las mediciones se hicieron correctamente y las escalas se escogen adecuadamente. Cuando el electrodo auxiliar de corriente se encuentra a una distancia adecuada la curva presenta una zona de pendiente mínima, casi nula. En la práctica los aparatos de medición tienen una sensibilidad limitada, por lo tanto es posible encontrar una distancia x a partir de la cual las lecturas se diferencian en una proporción muy pequeña de los valores medidos. La zona donde esto ocurre puede considerarse como la zona de mínima pendiente. Una vez que se determina en la curva la zona de mínima pendiente, el valor verdadero de la resistencia se obtiene trazando una horizontal a la curva en dicha zona.

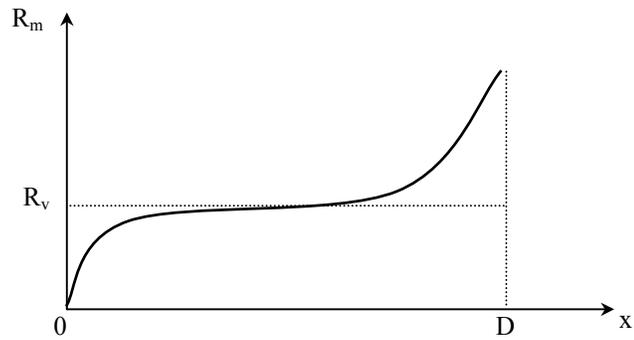


FIG. 8 Resistencia medida en función de la distancia x

Cuando por razones de espacio no es posible obtener una zona de pendiente mínima, se puede aplicar la regla del 61,9 %. Sin embargo la no homogeneidad del terreno en sentido vertical y/o horizontal afecta esta regla. En [2] se reporta un estudio teórico de la medición de la resistencia en suelos biestratificados. El resultado obtenido en este estudio se limita a SCT ubicados en el primer estrato, y se resume en una familia de curvas que se muestra en la figura 9(b).

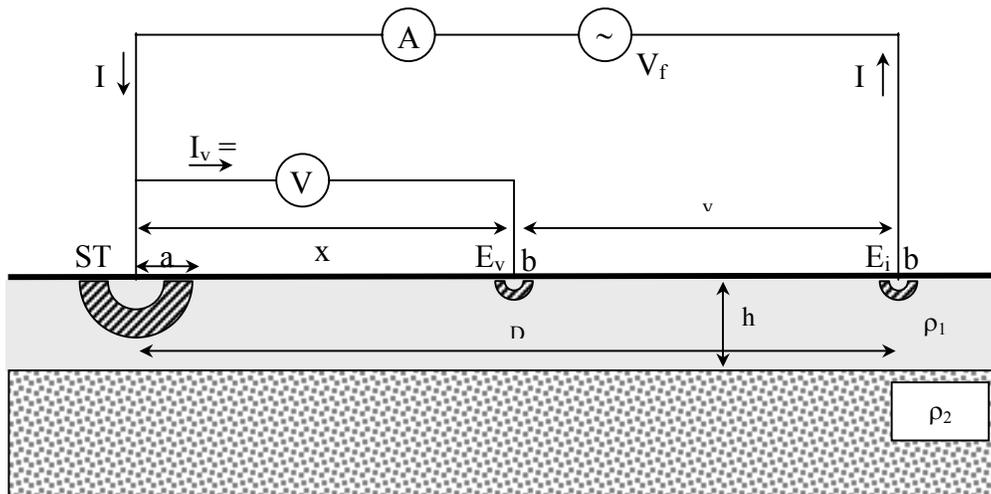


FIG.9 (a) Terreno biestratificado

FIG.9 (b) Posición de E_v para mínimo error

La definición de k es la siguiente:

$$k = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (24)$$

Los autores del trabajo en referencia llegaron a las siguientes conclusiones[2]:

- 1) Para $k=0$, terreno homogéneo se confirma la regla del 61,8 %.
- 2) Para $0 < k \leq 1$ el electrodo auxiliar de voltaje debe ubicarse más cercano al electrodo auxiliar de corriente para conseguir el valor verdadero de la resistencia a tierra.
- 3) Para $k \leq 0$ el electrodo auxiliar de voltaje debe alejarse del electrodo auxiliar de corriente para conseguir el valor verdadero de la resistencia a tierra.
- 4) En ambos casos la desviación del electrodo auxiliar de voltaje respecto a la regla del 61,8 % se incrementa con los valores absolutos de k. Para la relación h/D entre 0,05 y 5,0 la desviación es pronunciada.
- 5) Para $k > 0$ la desviación es mayor que para $k < 0$. Esto implica que un segundo estrato de alta resistividad influye sustancialmente en la medición de la resistencia a tierra, y su presencia no debe ser ignorada.
- 6) La relación $h/D > 5$ implica un estrato superficial grueso. En este caso el terreno puede considerarse homogéneo y se puede aplicar la regla del 61,8 %.
- 7) Si $D \gg h$ la distancia requerida de E_v para error cero tiende a la regla del 61,8 %.

Las conclusiones anteriores consideran un SCT de pequeñas dimensiones y ubicado solamente en el primer estrato. Cuando el SCT está en ambas capas el problema se complica. En este caso se puede recurrir a programas ya elaborados por diferentes autores para un análisis teórico del caso. Ver [1,2,3].

12. Observaciones y consideraciones sobre sistemas de conexión a tierra reales

Para una mejor comprensión del concepto de resistencia a tierra se ha utilizado un SCT en forma de hemisferio en un terreno homogéneo, esto simplificó los cálculos en aras de una mejor claridad del concepto. En el caso de SCT utilizados en la práctica, la geometría dista mucho de ser hemisférica. Se utilizan barras enterradas verticalmente, conductores enterrados horizontalmente la mayoría de las veces formando mallas, y en algunos casos una combinación de mallas y barra verticales. El terreno por lo general es heterogéneo con variaciones verticales y laterales de resistividad. Ante este panorama cabe preguntarse si los conceptos obtenidos con un SCT idealizado permanecen vigentes.

Afortunadamente la respuesta es positiva. En el caso de terrenos homogéneos, aún cuando la geometría del SCT no posea simetría alguna, se puede especular sobre la existencia de un *electrodo hemisférico equivalente* que presenta un valor de resistencia a tierra igual al del SCT real. Se maneja la hipótesis que un SCT de cualquier geometría visto desde una distancia muy grande puede considerarse como un electrodo hemisférico de radio desconocido. En el caso extremo desde una distancia muy grande como un punto de inyección de corriente.

Los perfiles de voltaje fuera del SCT serán similares a los de un electrodo hemisférico equivalente. Diferencias sustanciales existen en la zona perimetral del SCT. En la zona interna de un SCT los perfiles de voltaje son más complejos debido a la influencia de los componentes del SCT. En la figura 10 se muestra un SCT formado por un rectángulo enterrado horizontalmente.

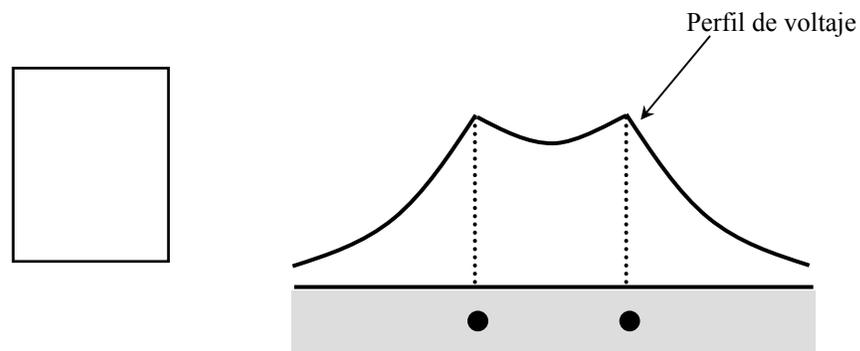


FIG. 10 SCT de forma rectangular

Es de notar que los puntos correspondientes al conductor tienen el mismo potencial. Es decir todo el perímetro del rectángulo, y los equipos conectados a él están al mismo potencial. Los perfiles de voltaje dentro y fuera del SCT son diferentes como se indica en la figura 10. Si existe una variación lateral de la resistividad ésta modificará la pendiente del perfil de voltaje, ya que la distribución de corrientes está afectada por los cambios de resistividad.

13. Voltaje de paso, de contacto y transferido

Con la ayuda del perfil de voltaje se pueden caracterizar las condiciones peligrosas asociadas a la circulación de corrientes al terreno por medio del SCT. Se han caracterizado tres condiciones peligrosas para el personal y equipo que se encuentran en las inmediaciones de un SCT por el que fluye una corriente a tierra: voltaje de paso, voltaje de contacto y voltaje transferido. En la figura 11 se muestran ejemplos de estas situaciones.

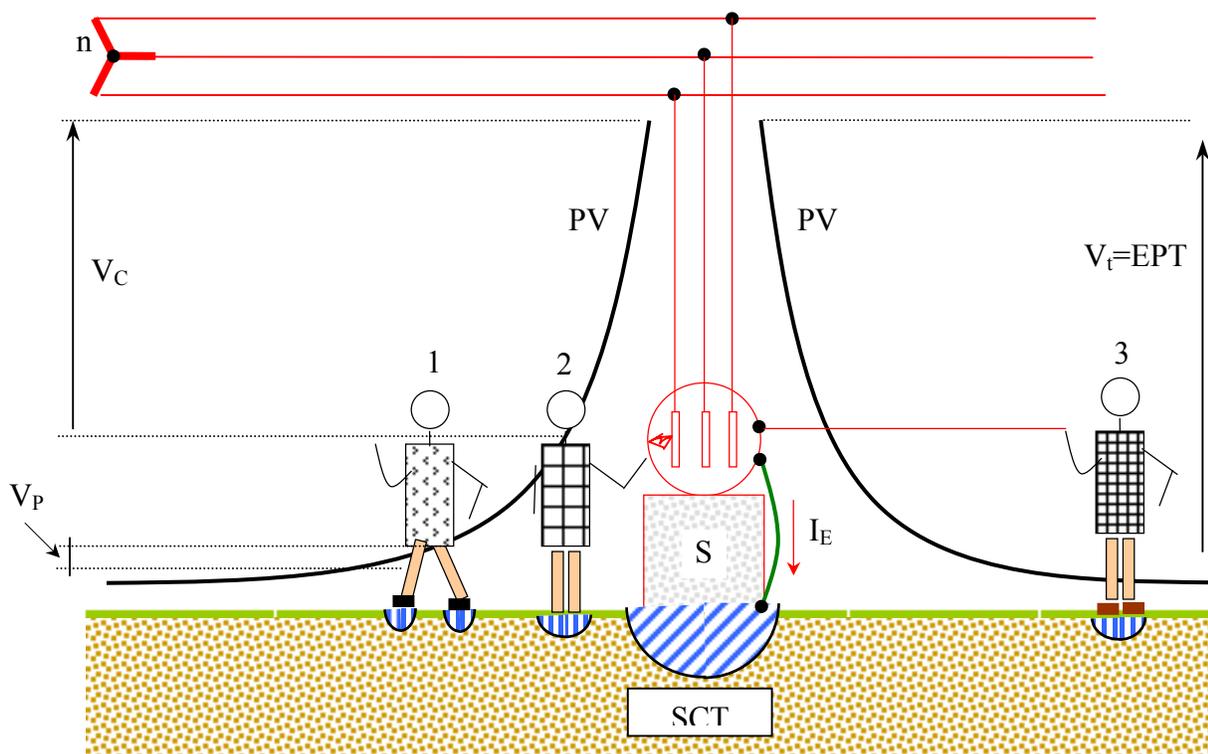


FIG. 11 Voltaje de paso, de contacto y transferido: V_p , V_c , V_t

Voltaje de Paso: La persona 1 soportará una diferencia de potencial V_p entre sus dos pies, debido a que cada pie está en contacto con puntos a diferentes potenciales en la superficie del terreno.

Voltaje de Contacto: La persona 2 soportará una diferencia de potencial V_c entre la mano o parte del cuerpo que toca el equipo y sus pies. Debido a que el equipo está a diferente potencial del punto de contacto de los pies con el terreno.

Voltaje Transferido: Esta es una forma particular del voltaje de contacto, agravado por el hecho de que la persona está en un punto distante del SCT, y no en sus inmediaciones como en los casos anteriores. La diferencia de potencial a la que está sometida la persona 3 es mayor que la de los casos anteriores. En el caso extremo de una persona ubicada en un punto remoto, la diferencia de potencial a la cual estará sometida será la denominada *Elevación del Potencial de Tierra (EPT)*, conocida por sus siglas en idioma inglés *GPR (Ground Potential Rise)*. El potencial EPT de un SCT es el potencial que adquiere respecto a un punto remoto, cuando circula por él una corriente de determinado valor hacia el terreno.

14. Equipo requerido para la medición

En el mercado se encuentran diferentes tipos de equipos diseñados para la medición de la resistencia a tierra mediante el método de la caída de potencial. Estos equipos son portátiles, alimentados por baterías y diseñados para el trabajo de campo. Si no se dispone de un equipo de estos, o resulta inadecuado para la medición, se puede utilizar una planta generadora o un transformador que permita aislar eléctricamente el voltaje aplicado a la prueba de cualquier otro sistema de alimentación existente. El voltímetro utilizado debe ser de alta impedancia.

El equipo de medición lo complementan los electrodos auxiliares y los conductores de conexión. Los electrodos auxiliares son secciones de barra de un material conductor adecuado con una longitud alrededor de los 0,5 m. Deben preverse varios electrodos auxiliares para ser conectados en paralelo como electrodo auxiliar de corriente.

La longitud de los conductores de conexión entre los electrodos auxiliares y el SCT bajo prueba depende de las dimensiones del SCT. Estos deben ser conductores aislados de un calibre adecuado para soportar la corriente inyectada y el esfuerzo mecánico requerido al momento de hacer el tendido de las conexiones.

Se requiere una cinta métrica por lo menos de 100 m de longitud hecha de material aislante. Para la seguridad del personal involucrado en la medición se requiere el uso de zapatos de seguridad y guantes aislados. El uso de los guantes aislados es obligatorio cuando se hacen pruebas en instalaciones operando normalmente. Se deben tomar medidas especiales de seguridad en aquellos sitios donde pueden aparecer voltajes peligrosos, si se presenta una falla a tierra en las instalaciones conectadas al SCT bajo prueba, o en instalaciones cercanas.

15. Ejemplo

A continuación se describe el procedimiento de medición llevado a cabo en una subestación de transformación 34,5/13,8 kV [7]. La subestación tiene un transformador 34,5/13,8 kV con una capacidad de 2,65 MVA. Alimenta dos circuitos a 13,8 kV y ocupa un área cuadrada de 156,25 m². Se desconoce la forma y construcción del sistema de conexión a tierra. Existe una conexión aérea con conductor desnudo de cobre que va desde una toma de tierra de la subestación pasando a través de un poste del circuito de 34,5 kV y conectada a tierra en un riachuelo que está a una distancia aproximada de 150 m de la subestación. El sitio geográfico de ubicación de la subestación es en el páramo andino sobre la cumbre de una montaña donde se puede observar afloramiento de piedra y formaciones de sedimentos, lo cual hace prever un terreno heterogéneo con variaciones verticales y laterales de la resistividad. En la figura 12 se muestran las rutas de medición escogidas.

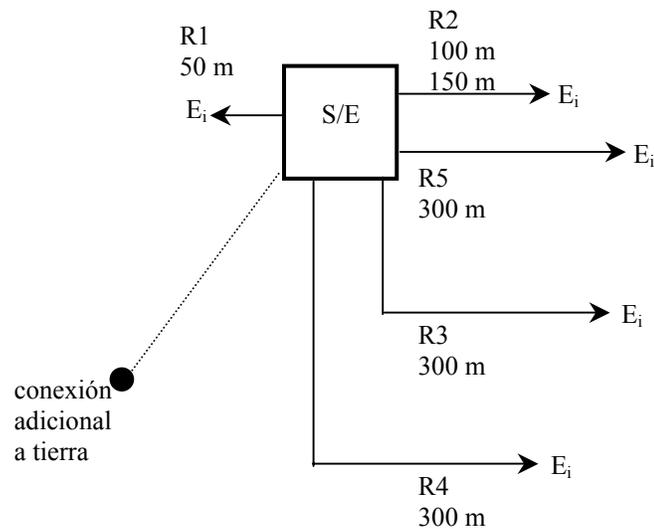


FIG. 12 Rutas escogidas para las mediciones

Durante la medición la subestación estaba en operación normal. Las líneas no tienen cable de guarda. Las mediciones se hicieron en las rutas indicadas en la figura 12, existieron problemas de sensibilidad con el equipo de medición debido a que se conseguían afloramientos de piedra que coincidían con la ubicación del electrodo auxiliar de voltaje. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla siguiente.

R1(50 m)		R2(100 m)		R2(150 m)		R3(300 m)		R4(300 m)		R5(300 m)	
x(m)	R(Ω)	x(m)	R(Ω)	x(m)	R(Ω)	x(m)	R(Ω)	x(m)	R(Ω)	x(m)	R(Ω)
2	11,0	5	13,5	5	13,5	5	10,5	5	10,5	5	13,5
4	11,5	10	15,0	10	23,0	10	12,0	10	12,0	10	18,5
6	13,5	15	15,0	20	19,0	15	13,0	15	13,0	15	19,5
8	12,0	20	15,8	35	23,0	20	10,0	20	10,0	20	20,0
10	15,5	35	14,0	49	25,0	25	10,0	25	10,0	25	19,0
12	13,5	49	14,0	73	24,0	50	12,0	50	12,0	50	18,0
14	18,5	59	18,0	84	23,0	75	10,0	75	10,0	75	13,5
16	30,9	73	20,5	94	21,0	100	16,2	100	16,2	100	14,0
18	32,5	80	36,0	110	16,5	125	14,0	125	11,5	125	13,5
20	26,2			120	17,0	150	14,0	150	16,2	150	13,5
22	23,5			130	19,0	175	10,0	175	10,5	175	15,5
24	45,5					200	14,5	200	16,5	200	15,5
26	37,7					213	14,0	208	16,2	225	
28	42,1							233	16,0		
30	32,5							258	16,2		
32	37,9										
34	65,0										
38	110,0										
40	355,0										
42	650,0										
44	1210,0										
46	2550,0										

Las curvas correspondientes a estos datos se muestran a continuación:

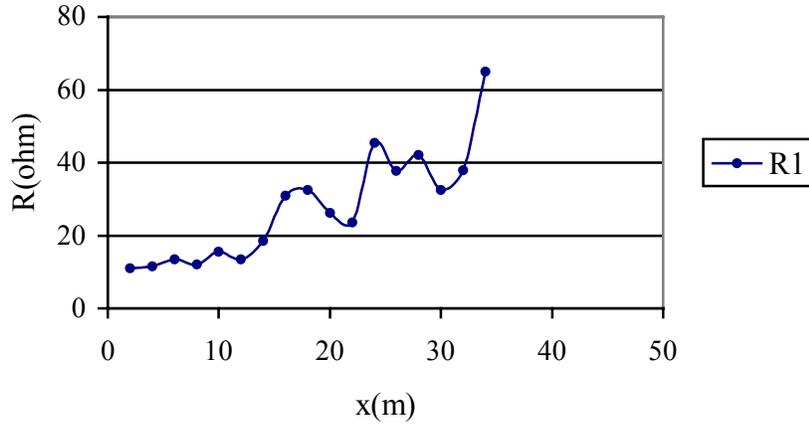


FIG.13 R v.s x, Ruta R1

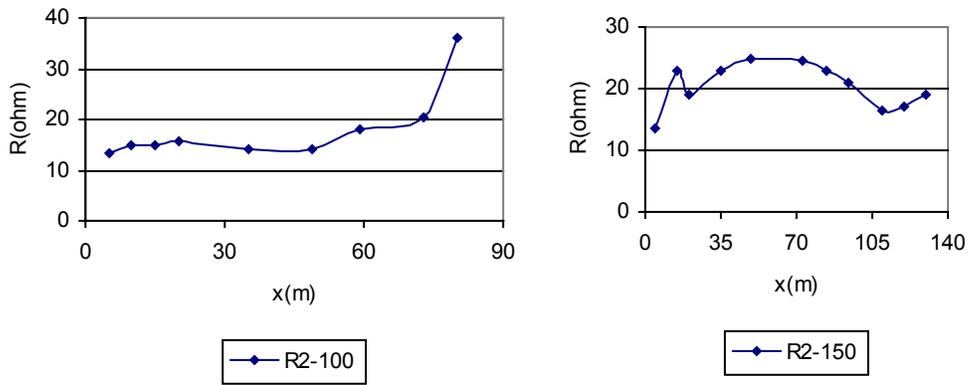


FIG.14 R v.s x, Ruta R2, 100 m –150 m

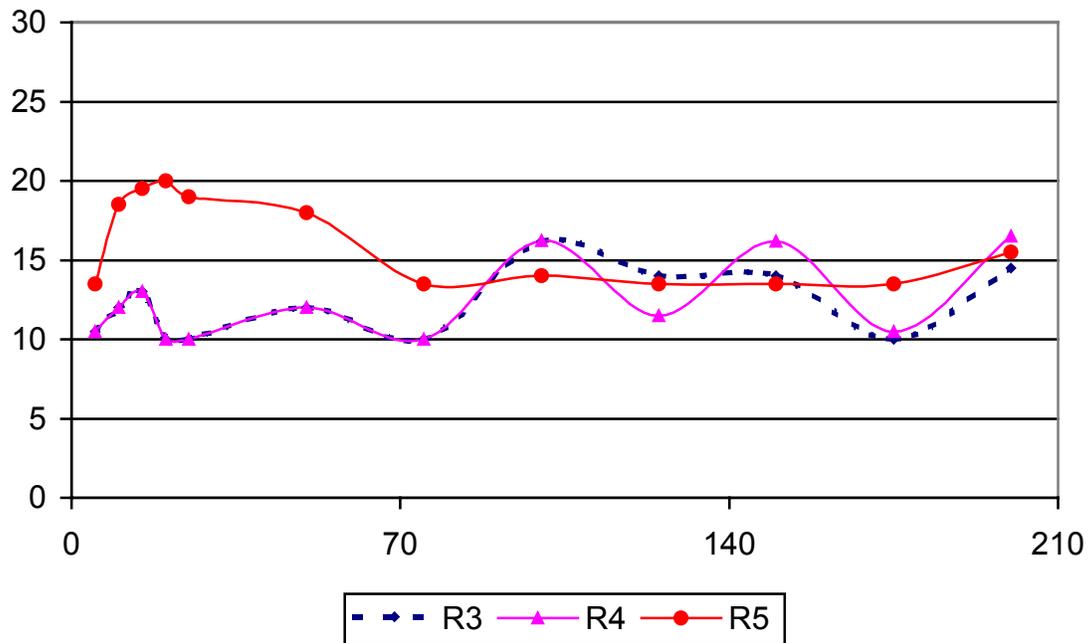


FIG.15 R v.s x, Rutas R3, R4, R5

Un análisis de las curvas mostradas permite llegar a las siguientes conclusiones:

- En la ruta R1, figura 13, la ubicación del electrodo auxiliar de corriente parece inadecuada por la forma de la curva con una pendiente que no parece minimizarse nunca. Se observa que en la medida que el electrodo auxiliar de potencial se acerca al electrodo auxiliar de corriente la curva se hace más pronunciada, como era de esperar. En este caso lucía recomendable incrementar la distancia de separación del electrodo auxiliar de corriente, no se hizo por limitaciones físicas del terreno.
- En la ruta R2 se hicieron mediciones para dos separaciones del electrodo auxiliar de corriente: 100 y 150 m. En la figura 14 se muestran las curvas correspondientes. Mientras que la curva para 100 m presenta una forma razonablemente aceptable, la curva correspondiente a 150 m es muy diferente presentando un máximo en las mediciones intermedias. En este caso la curva de 150 m se desecha por lo inesperado de su forma, se presume que las medidas se vieron afectadas por la presencia de material rocoso de elevada resistividad.
- Para las rutas 3, 4, 5 con separaciones del electrodo auxiliar de corriente a 300 m medidos en direcciones casi paralelas pero diferentes, las curvas se muestran en la figura 15. Curiosamente la curva correspondiente a R5 presenta un comportamiento similar a la curva correspondiente a la ruta 2- 150 m, solo que en R5 después de $x = 70$ m la curva tiende a estabilizarse alrededor de los 14Ω . Las curvas de R4 y R5 oscilan alrededor de R5, estas curvas son coincidentes hasta $x = 75$ m.

- Los valores estimados como “verdaderos” de la resistencia a tierra de la subestación lo podemos establecer a partir de R2-100 m y R5, que son las únicas curvas que presentan una zona de pendiente mínima claramente definida. Estos valores son:

$$R2-100: R = 15 \Omega$$

$$R5 \quad R = 14 \Omega$$

- Si se aplica la regla del 61,8 % las curvas de las rutas R1, R2-100 m y R5 se obtienen los siguientes valores:
Regla del 61,8 %

$$R1: \quad R = 33 \Omega$$

$$R2-100: R \approx 18 \Omega$$

$$R5: \quad R = 15 \Omega$$

Este resultado confirma que en terrenos heterogéneos la regla del 61,8 % puede conducir a resultados nada confiables, cuando la separación del electrodo auxiliar de corriente se encuentra a una distancia inadecuada del SCT bajo prueba.

15. Bibliografía

[1] AMORUSO V., SAVINO M., SYLOS M.:”Analysis of large grounding systems for earth resistance measurements in two layers soil”, Proc. IEE, vol. 136, Pt C, No. 3, May 1989.

[2] DAWALIBI F., MUKHEDKAR D.:”Ground electrode resistance measurements in non uniform soils”, IEEE vol. PAS-93, No. 1, 1974.

[3] DAWALIBI F., MUKHEDKAR D.:”Resistance measurements in large grounding systems”, IEEE vol. PAS-98, No. 6, 1979.

[4] EATON R.:”Sistemas de transmisión de energía eléctrica”, Ediciones del Castillo, Madrid, 1973.

[5] IEEE Std. 81-1983:”IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system”, IEEE, March 1983.

[6] MANINAT P., GARCIA G.:”Medición de resistividad de suelos y resistencia de puesta a tierra en subestaciones”, III Jornadas de Potencia, Maracaibo, Venezuela, Mayo 1982.

[7] REGNAULT M., FERNANDEZ J.:”Medición de la resistencia a tierra de la subestación El Aguila”, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 1991.

[8] SAYAGO A., GRATEROL J.: "Estudio cualitativo mediante modelos de los sistemas de puesta a tierra", Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 1989.

[9] VELAZQUEZ R., REYNOLDS P., MUKHEDKAR D.: "Eartg-Return Mutual Coupling Effects in Ground Resisyance Measurements of Extended Grids", IEEE vol. PAS-99, No. 1, Jan/Feb, 1980.

[10] ZUPPA F., LAIDIG J.: "A practical ground potential rise prediction technique for power stations", IEEE vol. PAS-99, No. 1, Jan/Feb, 1980.