



# LABORATORIO DE MEDICIONES

## **PUESTA A TIERRA**

MEDICIONES SEGÚN IRAM 2281-2 AEA 95501-2

Docente: Lic. RICARDO DEFRANCE (INSPT)

Consultor: Ing. CARLOS MANILI (AEA)

# **Resistividad del terreno y Puesta a Tierra**

## **Objetivo de la Práctica**

Determinar la resistividad del terreno mediante un telurímetro.

Determinar el valor de puesta a tierra de distintas tomas y comparar los resultados de la medición con los obtenidos analíticamente.

Determinar la conveniencia o no de la utilización de electrodos superficiales en caso de no tener posibilidad de usar electrodos hincados en el terreno.

## **Introducción**

### **Resistividad del terreno**

Los suelos tienen una conformación estratificada, con capas superpuestas con características conductivas propias que obedecen a los procesos de meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos a través de distintas edades geológicas; cuando son planos, son gruesos y laminares (litoral costero, llanura), cuando son accidentados, son irregulares y delgados (sierra, bosque montañoso).

La composición es diversa y compleja y varía según el lugar, en la capa limítrofe con la atmósfera, entre los 90 elementos que la caracterizan, predominan 8 de los cuales el oxígeno con el silicio y el aluminio en forma de óxidos hidratados, constituyen el 80 % de la masa total, seguidos por óxidos de hierro, magnesio y compuestos de calcio, sodio y potasio, y otros en forma de sales solubles en bajos porcentajes (del 0,05 % al 2 %) con poco contenido de humedad, menor al 1 % para suelos secos o hasta un 15 % para suelos arcillosos y húmedos.

Normalmente no son buenos conductores de la electricidad aunque la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción aceptable de naturaleza electrolítica y electroquímica, favorecida principalmente por la porosidad del material, su humedad y contenido de sales solubles, además de su granulometría, compactación y temperatura que influyen en su conductividad; sobre todo en las capas superficiales donde corrientes por encima de 10 A provocan su desecamiento por efecto Joule aumentando su resistividad.

La evaluación eléctrica de los suelos, se hace sobre la base de medidas de resistividad cuya unidad en el Sistema Internacional es el  $[\Omega.m]$  y la información geológica propone tablas genéricas con valores de referencia.

Tipo de Suelo	$\rho$ [ $\Omega.m$ ]
Limos, arcilla, suelo vegetal y de cultivo	10 – 100
Tierra fina, turbas, concreto húmedo	100 – 300
Tierra aluvial. arena firme, suelo seco	300 – 800
Arena eólica, lecho de río, cascajo	800 – 3000
Roca estratificada, fracturadas, monolíticas	3000 – 10.000
Suelos de granito	10.000 – 30.000
Concreto normal exterior (Seco)	30.000 – 50.000

También pueden usarse métodos de laboratorio, pero en virtud de las previsiones a tener en cuenta sólo es confiable la medición en campo para lograr una medición con errores mínimos.

## Medición de la resistencia de puesta a tierra

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

Las distintas normas de aplicación establecen que deben ponerse a tierra las partes metálicas de los equipos e instalaciones que no pertenezcan al circuito de servicio y que sean susceptibles de entrar en contacto con partes sometidas a tensión en caso falla o descarga de arcos. Por ese motivo, en los equipos y en las partes de instalación hay que prever un cable de puesta a tierra que lo conecte a la toma de tierra constituida por jabalinas o mallas de conductores enterrados.

Para una acción eficaz, resulta fundamental que la resistencia de puesta a tierra tome un valor tal que no origine tensiones peligrosas al circular la corriente de falla por lo que su valor está acotado por las normas de aplicación.

La base de un buen sistema de puesta a tierra comienza por la selección del mejor lugar de emplazamiento y el estado del suelo que rodeará a la toma procurando localizar el área con la más baja resistividad. Luego de su instalación, se debe ensayar la toma de tierra propiamente dicha para verificar que su valor se corresponde con el de diseño. Se recomienda realizar controles periódicos para detectar cambios en los valores correspondientes. Es así como por ejemplo en la Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles de la Asociación Electrotécnica Argentina, AEA 90364, Parte 7, Sección 771 Cláusula 771.23.4.3, establece que “para las viviendas, oficinas y locales (unitarios), las inspecciones periódicas deberán efectuarse en un plazo máximo de cinco años”, mientras que la Norma Oficial Mexicana establece que “se deben efectuar

mediciones periódicas para verificar el estado del electrodo y de preferencia en época de verano”, mientras que en U.S.A., la norma de protección contra descargas atmosféricas de la National Fire Protection Association, exige que se mantengan registros periódicos de mediciones de los sistemas de puesta a tierra.

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

En la práctica la medición puede ser influenciada por una serie de factores que impiden obtener resultados con gran exactitud, entre ellos se puede citar la existencia de corrientes vagabundas tanto de cc como de ca, el carácter electrolítico del terreno y su ocasional polarización, la presencia de estructuras metálicas enterradas, acoplamiento reactivo con otros sistemas, la irregularidad geológica del suelo, etc.

Para disminuir los efectos de las corrientes vagabundas de ca, es conveniente que en las mediciones no se utilicen corrientes cuyas frecuencias de trabajo sean múltiplos de la frecuencia de red (armónicas superiores). Se recomienda que sea:

$$f_n = [f_r (2n \pm 1) / 2] \pm 10 \text{ Hz}$$

Donde:

$f_n$ : Frecuencia de medición

$f_r$ : Frecuencia de red

$n$ : Número entero

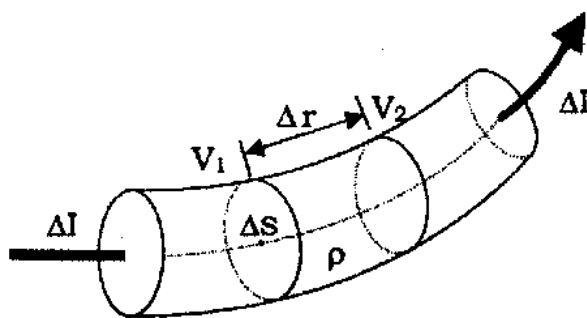
El uso de corrientes no unidireccionales evita la distorsión de los valores medidos por la acción de potenciales galvánicos y la polarización electrolítica. Además hay que tener en cuenta que la utilización de corriente continua periódicamente invertida puede dar como resultado valores de resistencia que no sean confiables para su uso con corriente alterna, como así mismo tampoco pueden ser útiles registros tomados con corriente alterna con una frecuencia muy distinta que la de red.

AEA 90364 establece la forma en que deben realizarse estas mediciones recomendándose, preferentemente, el método del telurímetro (Sección 771.23.5.2)

## Fundamentos Teóricos

### Conductividad del terreno

Para determinar las características de conductividad del suelo se toma un segmento de terreno por el que se hace circular una corriente y se mide una diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera.



donde:

$\Delta s$  es la sección del segmento

$\Delta r$  longitud del segmento

$\rho$  resistividad del terreno

$\Delta U$  diferencia de potencial entre dos puntos

$\Delta I$  corriente que circula por el segmento

La resistencia de este segmento en función de su resistividad está determinada por:

$$R = \rho \frac{\Delta r}{\Delta s}$$

Además, por Ley de Ohm, esa misma resistencia está dada por:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

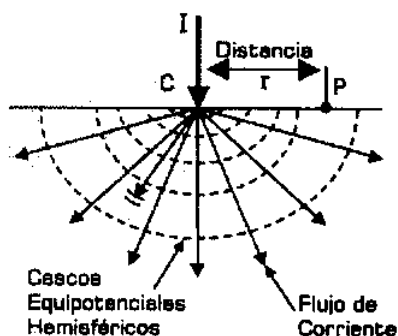
Igualando ambas expresiones y operando:

$$\frac{\Delta U}{\Delta I} = \rho \frac{\Delta r}{\Delta s} \Rightarrow \Delta I = \frac{\Delta s}{\rho} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta r}$$

Donde  $\Delta U / \Delta r$  es la intensidad de campo eléctrico  $E$  y la corriente es directamente proporcional a la superficie de dispersión, lo que hace que la tierra tenga una capacidad de conducción ilimitada salvo valor importante de  $\rho$ .

Esta capacidad de conducción del terreno permite que una puesta a tierra sea un camino de baja impedancia para descargas de altas corrientes, ya sean de falla o de descarga (pararrayos) o como referencia de potencial para el accionamiento de elementos de seguridad como interruptores diferenciales.

## Determinación de la resistividad del terreno



Sea un suelo de resistividad homogénea, al inyectar corriente en un punto, ésta se dispersa en el terreno formando hemisferios equipotenciales concéntricos cuya superficie es  $2\pi r^2$ .

El conocimiento de la dispersión de la corriente bajo esta hipótesis permite determinar el potencial de un electrodo y su resistencia de dispersión.

Sabemos que:

$$E = \rho \cdot J$$

Donde:

$E$ : intensidad de campo eléctrico

$\rho$ : resistividad del terreno

$J$ : densidad de corriente

Que están definidas por:

$$E = \frac{dU}{dr} \quad \text{y} \quad J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

Reemplazando a  $E$  y  $J$  por sus expresiones:

$$\frac{dU}{dr} = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \Rightarrow dU = \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr$$

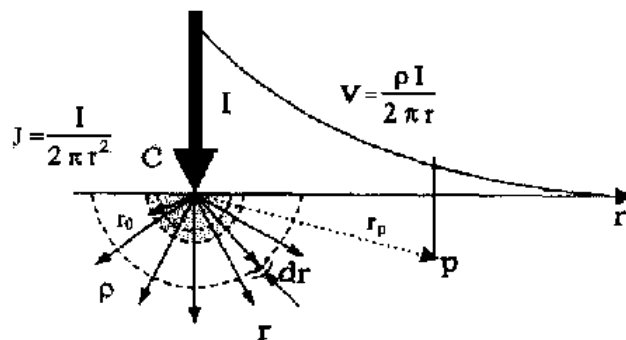
Integrando entre el origen y un punto genérico  $r$

$$U = \int_0^r \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr$$

$$U = \rho \frac{I}{2\pi r}$$

Se obtiene el potencial a partir del punto C (punto de inyección de corriente) respecto del infinito a una distancia cualquiera  $r$ .

Si el punto de inyección de corriente C tuviese un radio  $r_0$  y se quisiera encontrar la

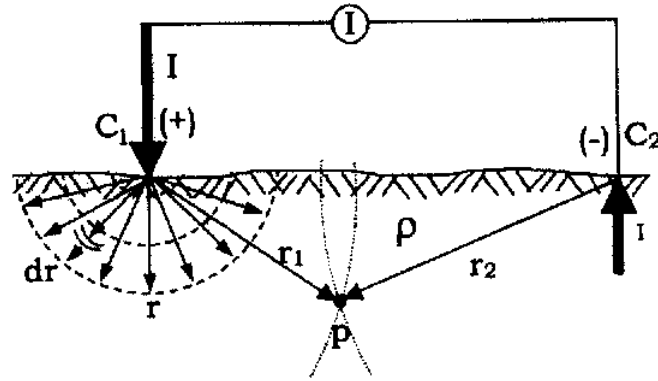


diferencia de potencial respecto de un punto  $p$  situado a una distancia  $r_p$

La diferencia de potencial se obtendrá como:

$$\Delta U = U_0 - U_p = \rho \frac{I}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_p} \right)$$

En cambio, si se inyecta corriente en un punto y se la hace circular por el terreno cerrando al circuito a través de un elemento externo, se puede determinar el potencial de un punto  $p$  respecto de los puntos de inyección y de extracción de la misma.



En este caso, los potenciales del punto  $p$  inducidos tanto desde  $C_1$  como desde  $C_2$  serán:

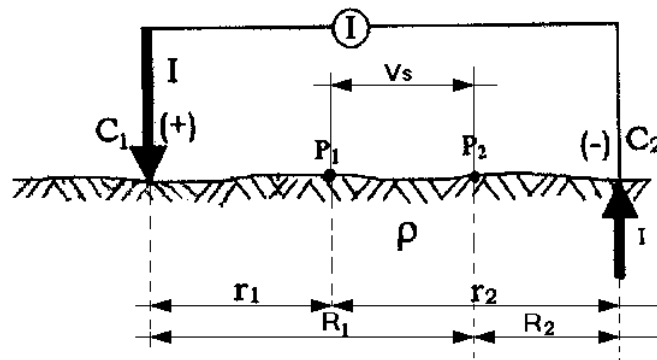
$$U_{p1} = \rho \frac{I}{2\pi r_1} \qquad U_{p2} = -\rho \frac{I}{2\pi r_2}$$

El potencial total de este punto estará definido por la suma de los dos potenciales

$$U_p = U_{p1} + U_{p2}$$

$$U_p = \rho \frac{I}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

De la misma manera, para determinar la diferencia de potencial entre dos puntos del



terreno:

$$U_s = \rho \frac{I}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

A los términos encerrados entre paréntesis suele llamárselos factor de forma.

Conociendo las magnitudes de  $U_s$  e  $I$  determinadas por instrumentos convencionales puede determinarse el valor de  $R$  por medio de su cociente o directamente con un telurímetro y midiendo las distancias entre electrodos se obtiene el valor de  $\rho$ . De la misma forma, conociendo previamente el valor de resistividad, puede determinarse el valor de la resistencia de dispersión.

## Análisis de los electrodos

Se había visto, que admitiendo la hipótesis que al inyectar corriente en un punto del suelo, la corriente se dispersa formando capas hemisféricas equipotenciales, la expresión del potencial en función de la distancia al punto de inyección era:

$$dU = \rho \frac{I}{2\pi r^2} dr$$

Por lo que la resistencia de cada capa, de espesor infinitesimal será:

$$dR = \rho \frac{1}{2\pi r^2} dr$$

A medida que nos alejemos del punto de inyección, aumentará la superficie disminuyendo por lo tanto la resistencia del sistema.

Si se utiliza para la inyección de corriente a un electrodo hemisférico de radio  $r$ , de resistencia despreciable, para obtener la resistencia desde el punto de contacto del electrodo hasta el infinito, deberán sumarse las infinitas capas resistivas del terreno, es decir:

$$\int_r^\infty dR = \int_r^\infty \frac{\rho}{2\pi r^2} dr$$

Con lo que se obtiene:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right)$$

$$\Rightarrow R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

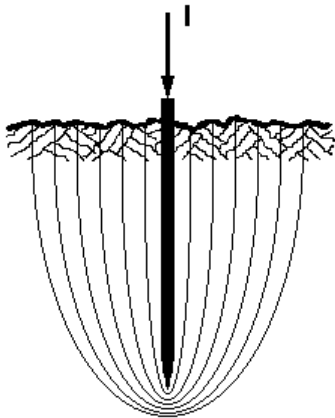
En la práctica no se considera a un punto en el infinito, sino a una distancia lo suficientemente grande como para considerarlo un punto alejado, como puede ser veinte veces el radio del electrodo.

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{20r} \right)$$

$$\Rightarrow R = 0,95 \frac{\rho}{2\pi r}$$



Es decir que a veinte veces el radio del electrodo se encuentra el 95 % de la resistencia de puesta a tierra.



El modelo de electrodo hemisférico es conveniente para el análisis, pero en la práctica se utiliza una jabalina; aunque la geometría de las capas equipotenciales no difiere demasiado de las ya estudiadas.

A medida que nos alejamos del electrodo, las capas equipotenciales, van adoptando la forma de un hemisferio, perdiendo importancia el largo del mismo. Mediante ensayos, puede determinarse la equivalencia entre una jabalina y un electrodo hemisférico, una expresión práctica, es la siguiente:

$$r_{eq} \cong \frac{l}{\ln \frac{l}{r}}$$

Donde

$r_{eq}$ : radio equivalente de un electrodo semiesférico

$l$ : largo de la jabalina

$r$ : radio de la jabalina

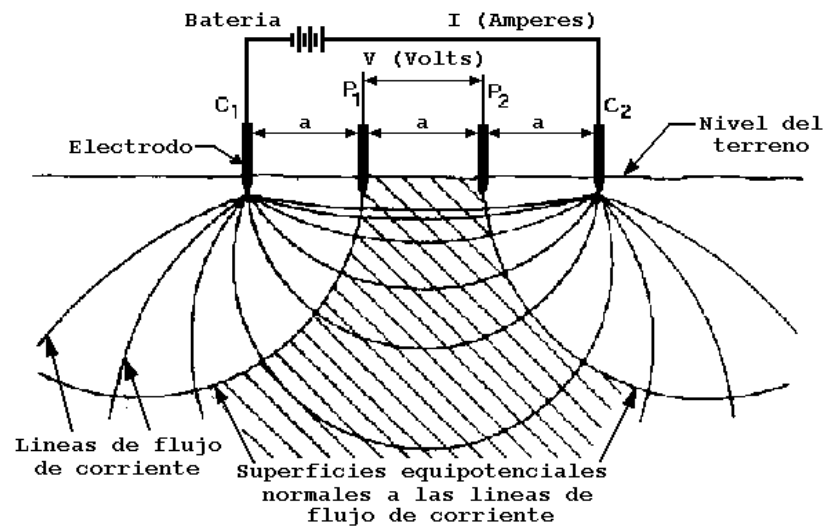
El término  $\ln(l/r)$  vale aproximadamente 5, es decir, que una jabalina se comporta como un electrodo semiesférico de radio aproximado a la quinta parte de su largo.

## Medición de la resistividad del suelo

### Método geoelectrico de Wenner

El método se utilizó inicialmente para estudios geológicos tales como la detección del nivel freático o la superficie de separación entre aguas de distinta salinidad. Se basa en que diferentes materiales ofrecen distintas resistencias al paso de una corriente eléctrica, de esta manera se puede medir la resistividad del terreno que depende principalmente de su humedad y salinidad del agua en sus poros, siendo por lo tanto, influenciada por el índice de porosidad, tamaño de las partículas la estratificación y temperatura.

La configuración más utilizada es la siguiente



Es necesario que la disposición de los electrodos usados para la medición sea equiespaciada y en una misma línea para que el factor de forma previamente visto dé por resultado  $1/a$  para la simplificación de los cálculos.

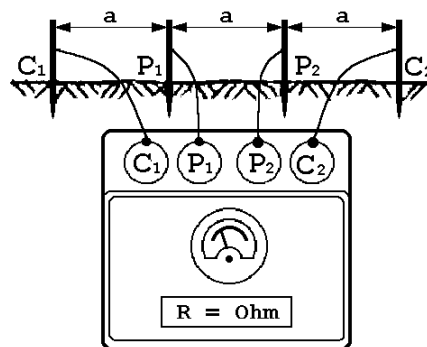
En este caso:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot U \cdot a}{I}$$

Para la medición es necesaria una fuente que inyecte una corriente  $I$  de valor conocido al terreno en los puntos C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>, y un voltímetro que mida la diferencia de potencial entre los puntos de medición P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>.

Otra disposición similar es utilizando a un telurímetro como instrumento de medición.

El telurímetro tiene la ventaja de utilizar una frecuencia de trabajo distinta de las de

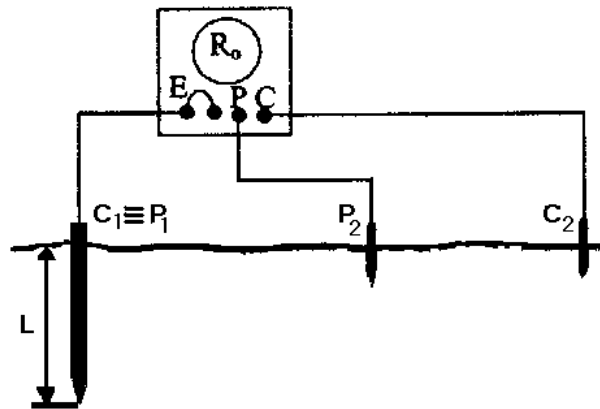


uso industrial, inyectada por el mismo instrumento, de manera que puede discriminar todas aquellas corrientes de distinta frecuencia y fase que la inyectada, independizando a la medición de las corrientes errantes que pudiesen existir al momento del ensayo; a pesar de ser un voltímetro, está tarado en  $\Omega$  permitiendo una lectura directa.

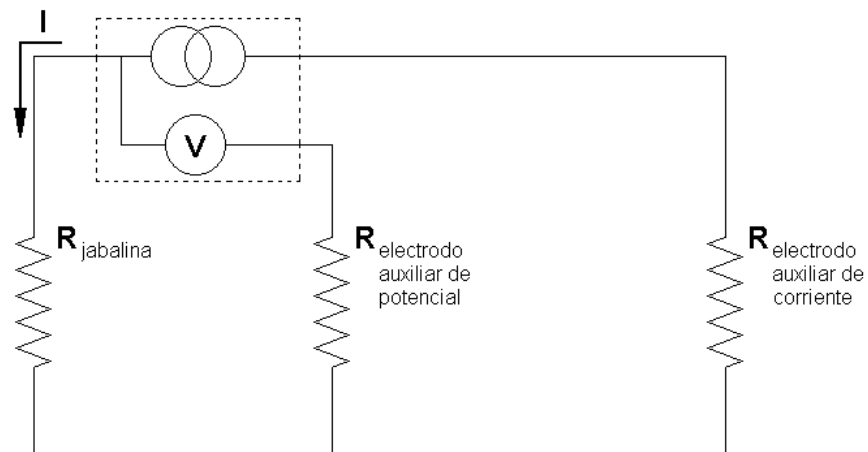
El instrumento exige una calibración previa al ensayo. Algunos, poseen indicación de corrientes errantes indicando la posibilidad o no de medición, en estos casos se deberá modificar la posición de los electrodos.

## Medición de Puesta a Tierra

Puede utilizarse para la medición, un telurímetro puenteando en el instrumento a los puntos  $C_1$  y  $P_1$ .



Cuyo esquema eléctrico es el que sigue:



El ajuste de corriente depende del generador, por lo que tiene en cuenta tanto a la resistencia de la jabalina como a la del electrodo auxiliar de corriente; la resistencia de los conductores es despreciable, la impedancia del voltímetro es elevada por lo que se desprecia la resistencia del electrodo de potencial; la medición de tensión se realiza efectivamente sobre la jabalina

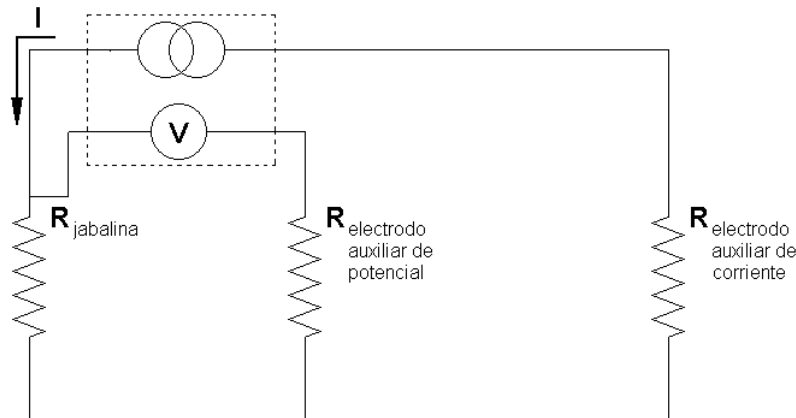
Un punto de interés es el caso de la medición de resistencias de puesta a tierra muy bajas (décimas de  $\Omega$ ), en esta situación la resistencia del cable de la jabalina puede cobrar cierta importancia:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

$$R = 0,018 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{5 \text{m}}{\text{mm}^2}$$

$$R = 0,09 \Omega \approx 0,1 \Omega$$

La manera de solucionar este inconveniente es efectuando una medición con cuatro conductores.



En este caso la resistencia de los conductores queda solapada por la alta impedancia del voltímetro.

Otro problema a tener en cuenta es la clase del instrumento. Con un instrumento de clase 2,5, para un alcance de  $10 \Omega$ , se estará cometiendo un error del 2,5 % ( $0,25 \Omega$ ). La suma del error del instrumento más la resistencia propia del conductor de jabalina pueden dar un resultado del orden del valor de la puesta a tierra medida.

## Desarrollo de la práctica

### Instrumental utilizado

#### Telurímetro

Marca: Metra Blansko

Modelo: PU 430

Clase: 3

#### Electrodos de prueba para medición de resistividad

Jabalinas de  $0,5 \text{ m} \times 10 \text{ mm}$

#### Electrodos de toma a tierra

Jabalinas de  $1,6 \text{ m} \times 16 \text{ mm}$

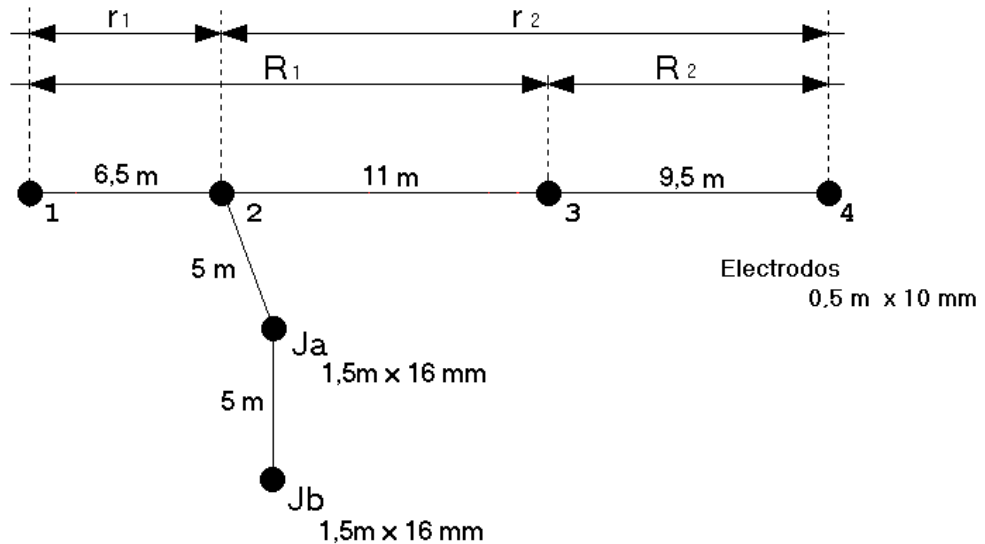
#### Electrodos superficiales

Planchuela de hierro transitable (tipo semilla de melón)

Superficie: 22 cm x 30 cm

Espesor: 3,2 mm

Peso: 1,750 kg.



## Disposición de electrodos

## Medición de la resistividad

El valor de resistividad del terreno para la Ciudad de Buenos Aires y alrededores varía entre  $10 \Omega \cdot m$  y  $20 \Omega \cdot m$ .

Como primera hipótesis se supone a los electrodos como concentrados en un punto tomando el modelo de dispersión de una semiesfera ideal.

Para este caso:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

El valor de resistencia obtenido con el telurímetro fue:

$R = 0,1 \Omega$
------------------

Reemplazando:

$$0,1 \Omega = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{6,5m} - \frac{1}{20,5m} - \frac{1}{17,5m} + \frac{1}{9,5m} \right)$$

$$0,1 \Omega = \frac{\rho}{2\pi} 0,153 \frac{1}{m}$$

$$\rho = \frac{0,1 \, \Omega}{0,153 \, \frac{1}{m}} 2\pi = 4,1 \, \Omega.m$$

$$\rho = 4,1 \, \Omega.m$$

Valor extremadamente bajo respecto al esperado, pero teniendo en cuenta que el instrumento utilizado es un instrumento de medición en campo de clase 3, y que la lectura fue efectuada a extremo de escala que es donde más error se comete, se debe tener en cuenta una diferencia de  $\pm 3 \%$ , esto es  $\pm 0,3 \, \Omega$  para el alcance R x1 (máximo alcance: 10  $\Omega$ ).

Si se tiene en cuenta el error máximo posible (0,3  $\Omega$ ):

$$R = 0,4 \, \Omega$$

Por lo que  $\rho$  valdrá:

$$\rho = \frac{0,4}{0,153 \, \frac{1}{m}} 2\pi = 16,4 \, \Omega.m$$

$$\rho = 16,4 \, \Omega.m$$

Valor similar al esperado.

Para el caso real que nos ocupa, con una jabalina por electrodo, la distribución del potencial varía según la siguiente expresión:

$$f_{(U)} = I \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + r^2} + L}{r}$$

Donde:

$I$  : intensidad de corriente

$L$  : longitud de la jabalina

$r$  : distancia a la jabalina

Por lo que en este caso, el valor de la resistencia de dispersión, afectada por el nuevo factor de forma, será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{\sqrt{L^2 + r_1^2} + L}{r_1} - \ln \frac{\sqrt{L^2 + r_2^2} + L}{r_2} - \ln \frac{\sqrt{L^2 + R_1^2} + L}{R_1} - \ln \frac{\sqrt{L^2 + R_2^2} + L}{R_2} \right)$$

Reemplazando valores:

$$0,4 \Omega = \rho \frac{1}{2 \pi 0,5 m} (0,076)$$

$$\rho = \frac{0,4 \Omega 2 \pi 0,5 m}{0,076} = 16,5 \Omega.m$$

$\rho = 16,5 \Omega.m$
------------------------

Válido sólo para electrodos cortos, es decir que en este caso, y para simplificar los cálculos, pueden considerarse a los electrodos como concentrados en un punto cometiendo un error menor al 1%.

## Medición de puesta a tierra con telurímetro

Se utilizaron como electrodos auxiliares de medición a las jabalinas 2 (para la medición de potencial respecto de cada toma) y 4 (para inyección de corriente).

Valores obtenidos:

- |    |   |   |                      |
|----|---|---|----------------------|
| a) | Resistencia de puesta a tierra del INSPT        | = | $0,2 \pm 0,3 \Omega$ |
| b) | Resistencia de puesta a tierra electrodo Ja     | = | $9,4 \pm 0,3 \Omega$ |
| c) | Resistencia de puesta a tierra electrodo Jb     | = | $160 \pm 4,8 \Omega$ |
| d) | Resistencia de puesta a tierra paralelo Ja - Jb | = | $9 \pm 0,3 \Omega$   |

## Verificación de las mediciones mediante el valor de resistividad obtenido

- a) La toma a tierra del INSPT es una tierra distribuida de la que no se conoce su disposición topologica por lo que no se puede corroborar analíticamente.

- b) Para electrodo Ja

Para el cálculo de resistencia de puesta a tierra, la IEEE recomienda como fórmula de cálculo:

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

$\rho$  = resistividad del terreno

$L$  = largo del electrodo

$r$  = radio del electrodo

$$R = \frac{16,4 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 1,5 m} \left( \ln \frac{4 \cdot 1,5 m}{0,008 m} - 1 \right)$$

$$R = 9,7 \, \Omega$$

- c) El electrodo Jb es idéntico al anterior, pero su medición es muy distinta y elevada. Al no comprobarse error en la medición se concluye que la diferencia de valor puede deberse a que el terreno no sea homogéneo en ese punto o que la misma esté corroída y severamente dañada.
- d) Para el caso de jabalinas en paralelo, la expresión recomendada para la determinación de su valor es:

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} + \dots \right)$$

$\rho$  = resistividad del terreno

$L$  = longitud del electrodo

$s$  = separación entre electrodos

$r$  = radio del electrodo

Válida sólo para  $s > L$

En este caso, por las mediciones previamente realizadas, se sabe que, al ser las dos jabalinas iguales, podemos estar enfrentados a una importante diferencia de resistividad en el sector de Jb, por lo que esta expresión no es válida.

Dados los valores de cada una de ellas, se procederá a sumarlas como dos resistencias en paralelo.

$$J_a // J_b = \frac{J_a \cdot J_b}{J_a + J_b} = \frac{9,4 \, \Omega \cdot 160 \, \Omega}{9,4 \, \Omega + 160 \, \Omega} = 8,8 \, \Omega$$

$$R = 8,8 \, \Omega$$

## Medición de la puesta a tierra con telurímetro y electrodos superficiales

Para el caso en que no se puedan hincar electrodos auxiliares para la medición de una puesta a tierra, pueden utilizarse electrodos superficiales. El método es una adaptación de IRAM 2281-2, consiste en la utilización de un paño húmedo de aproximadamente 30 x 30 cm sobre el cual se coloca una chapa metálica de 25 x 25 cm, cargada con un peso de unos 75 kg. (equivalente aproximado al peso de una persona adulta) para lograr una transmisión uniforme de la presión. Los mejores resultados se obtienen con la tela suficientemente humedecida (o mojada).



Valores obtenidos:

a)	Resistencia de puesta a tierra del INSPT	=	$0,4 \pm 0,3 \, \Omega$
b)	Resistencia de puesta a tierra electrodo Ja	=	$9,8 \pm 0,3 \, \Omega$
c)	Resistencia de puesta a tierra electrodo Jb	=	$170 \pm 4,8 \, \Omega$
d)	Resistencia de puesta a tierra paralelo Ja - Jb	=	$9,2 \pm 0,3 \, \Omega$

Donde se observa que los valores difieren con los obtenidos primeramente en una pequeña proporción (aproximadamente un 5%) debido a la introducción de la resistencia de contacto del electrodo superficial que no es despreciable; no es así en el caso de la medición de resistencias muy bajas como es por ejemplo la puesta a tierra del INSPT.

## Conclusiones

- La hipótesis de la forma de semiesferas concéntricas para la dispersión de la corriente inyectada en un punto es válida.
- La intensidad de campo eléctrico E es inversamente proporcional a la distancia del punto de inyección al cuadrado.
- La medición de la caída de potencial, se relaciona directamente con la disposición de los electrodos (factor de forma).
- Para electrodos cortos, pueden suponerse a los mismos como concentrados en un punto independizándolos de sus dimensiones y asimilándolos al modelo de semiesferas.
- Teniendo en cuenta lo expuesto se puede medir una diferencia de potencial directamente en el suelo mediante una geometría simple de disposición de electrodos en el terreno.
- Por lo anteriormente dicho se comprueba que el Método de Wenner es un modo simple, directo y confiable de medición de resistividad del terreno.
- El instrumento utilizado (de clase 3), no es óptimo para la medición de bajas resistencias (décimas de  $\Omega$ ) debido al error introducido.
- Para minimizar en parte el error cometido, podría haberse utilizado el método de cuatro conductores.
- La utilización de electrodos superficiales en caso de no poder utilizar varillas hincadas directamente en el terreno, es un método válido de medición siempre que se tenga en cuenta una buena implementación de los mismos (superficie de contacto y humedad de la misma, distancia entre electrodos y peso dispuesto sobre los mismos).