

PRÁCTICA: RESISTENCIA DE UNA TOMA DE TIERRA

MEDIDA DE:

- A) RESISTENCIA DE UNA TOMA DE TIERRA
- B) RESISTIVIDAD DEL TERRENO

A) RESISTENCIA DE UNA TOMA O PUESTA A TIERRA

Definiciones:

Puesta a tierra: esta denominación comprende toda ligazón metálica directa, sin fusible, ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos de una instalación y un electrodo enterrado en el suelo, con el objeto de:

- **Proteger a las personas** limitando la tensión o diferencia de potencial, a un valor no peligroso, que respecto de tierra pueden alcanzar las masas metálicas y además permitir el accionamiento de los dispositivos de protección del circuito en un tiempo corto, según las normas vigentes.
- **Facilitar el paso** de las corrientes de falla y de descarga de origen atmosférico al suelo.
- **Por suelo** se entiende una porción del planeta tierra.

La puesta a tierra esta formada por:

- **Toma de tierra:**

Electrodo: es la masa metálica en contacto permanente con el suelo

Líneas de enlace con tierra: es el conductor que une el electrodo con el punto de puesta a tierra

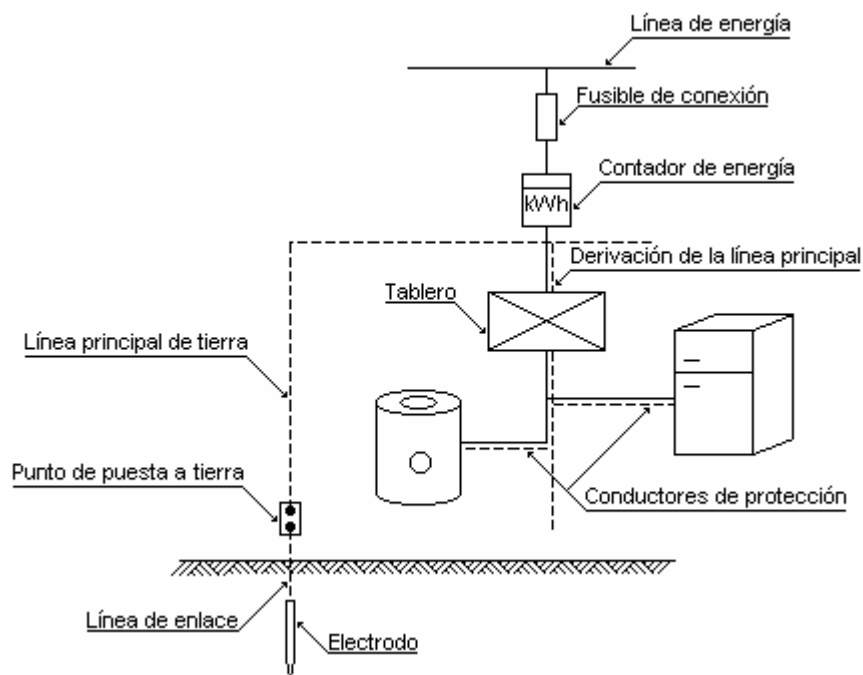
Punto de puesta a tierra: es el punto accesible que une el electrodo con la línea de enlace

- **Líneas de tierra:**

Principales

Derivaciones

Conductores de protección, que unen eléctricamente las masas metálicas de la instalación a las líneas de derivación



Electrodo:

El Electrodo de puesta a tierra es uno de los elementos principales del sistema de puesta a tierra. Uno de los criterios mas importantes para la elección de un sistema de puesta a tierra es el valor

óhmico de su resistencia eléctrica, que presentará al pasaje de la corriente de falla. Es evidente que esta corriente deberá ser lo mas baja posible y en principio su valor mínimo será limitado por razones económicas.

Para las centrales de generación de energía y estaciones transformadoras de rebaje su valor estará comprendido entre 0,1 a 0,5 Ω , en estaciones de distribución primaria entre 1 y 10 Ω y no debe superar los 15 Ω .

La Resistencia de una toma de tierra esta compuesta según la norma IRAM 2281

$$R_T = R_S + R_{TR} + R_E$$

- **R_T: resistencia total**
- **R_S resistencia específica del suelo** (planeta tierra). Esta resistencia se mide en ($\Omega \cdot m^2 / m$) o ($\Omega \cdot m$) y es también llamada resistividad del terreno. Esta representa la resistencia entre 2 caras opuestas de un cubo de tierra de un metro de arista.
- **R_{TR}: resistencia de transición**, tránsito, dispersión, derrame, contacto de un electrodo de tierra y el suelo.
- **R_E: resistencia del electrodo y conductores metálicos** que integran la puesta a tierra, su valor ohmico es muy bajo.

La R_S se trata en el punto específico del practico. En cuanto a R_E se dice que su valor ohmico es muy bajo y frente a la R_{TR} se considera despreciable. La R_{TR} puede ser una porción significativa de la resistencia total. Así que se asegura mediante ensayos de campo y laboratorio que la resistencia de transición es pequeña en suelos húmedos y grande en terrenos secos. La resistencia disminuye rápidamente cuando la humedad es > al 15%. La calidad del terreno tiene vital importancia en el valor de la R_{TR} y establecerá las dimensiones superficiales, longitudinales y de empotramiento de los distintos tipos de electrodos.

Clases de electrodos de toma de tierra

Pueden ser:

- **Profundidad o barra:** constituidos por tubos o perfiles de material adecuado que se incrustan en el suelo. También se los llama “ jabalinas “. Su resistencia de transición depende de su longitud y sección. Si se necesitan varios electrodos de este tipo con el objeto de alcanzar una baja resistencia de transición, se tratará de obtener una distancia entre si igual al doble de la longitud de una de las jabalinas. Si están conectadas en paralelo, no son activas en toda su longitud por estar la capa superior del suelo, por ejemplo, helado o seco, se elegirá la distancia mínima igual al doble de la longitud activa.

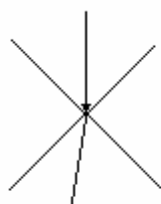
El empleo de un electrodo de gran profundidad se justifica en suelos heterogéneo, cuando el subsuelo es mas conductor que la capa superficial.

- **Superficiales:** que pueden ser de 2 clases:

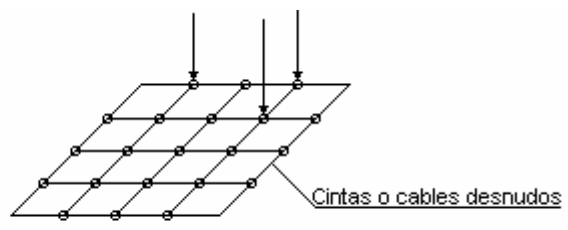
Cintas o cables que se entierran a una profundidad de 0,5 a 1 m

Platinas o planchas con o sin perforaciones

Los electrodos superficiales de cinta se pueden disponer en el suelo en forma radial o de mallas o combinaciones de las mismas. El empleo de del sistema de mallas es comúnmente empleado en grandes estaciones transformadoras de sistemas de potencia.



RADIAL



MALLA

Criterio técnico en la selección de jabalinas :

Cuando se diseña una puesta a tierra es fundamental considerar que la eficacia y seguridad de la misma se debe mantener vigente durante la vida útil de la instalación a proteger, máximo cuando no se realizan mediciones periódicas de la resistencia eléctrica de tierra y su correspondiente mantenimiento. Teniendo en cuenta la importancia de la puesta a tierra en la operación de la instalación y la seguridad humana y dada su relativa baja incidencia en el costo total de una instalación (del orden del 1 al 3 %) es muy importante que los materiales que se utilicen sean lo mas inalterables en el tiempo. De no ser así, si avanza la corrosión, aumenta la resistencia de la puesta a tierra haciéndola ineficaz.

Los materiales que comúnmente se utilizan son: acero galvanizado, cobre y cobre con alma de acero.

- **Acero galvanizado:** sufre una rápida corrosión, se esta desechando su utilización debido a que pierde confiabilidad al poco tiempo.
- **Cobre:** es el metal no precioso que mejor se comporta ante la corrosión bajo suelo, pero no se lo utiliza debido a los robos y a su poca resistencia mecánica, que no permite su hincado directo.
- **Cobre con alma de acero:** tiene las ventajas mecánicas del acero, permitiendo su hincado directo a golpes. Posee la resistencia a la corrosión del cobre, además no es codiciado por los ladrones, ya que el cobre que posee es de costosa recuperación y carece de valor de reventa.

Principios de la puesta tierra:

Para lograr una correcta puesta tierra es necesario considerar los efectos de los distintos factores que intervienen:

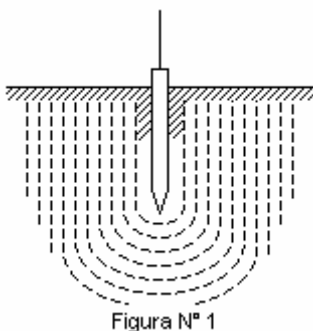


Figura N° 1

- **Efecto del Suelo:** La resistividad del terreno es el factor determinante de la resistencia de cualquier toma de tierra. Considerando al suelo dividido en capas cilíndricas de igual espesor que rodean al electrodo y suponiendo uniforme la resistividad del terreno en esa zona, se puede observar: **que la primera capa alrededor del electrodo es la que ofrece mayor resistencia**, ya que presenta menor sección al paso de la corriente. A una distancia de 2,5 a 3 m la superficie de la capa es tan grande, que su resistencia es despreciable comparada con la de la 1° capa. Las medidas efectuadas indican que el 90% de la resistencia se encuentra en un radio de 1,5 a 3 m del electrodo.

- **Efecto del diámetro de la jabalina:** El aumento del diámetro de la jabalina no disminuye proporcionalmente la resistencia del electrodo, es el suelo quien a través de su resistividad el que determina el valor de la resistencia. Los ensayos demuestran que la diferencia de resistencia obtenida con los distintos diámetros de jabalinas disponibles comercialmente, son despreciables. Por lo que la determinación del diámetro de la jabalina depende de la resistencia mecánica del suelo. Es importante que la jabalina tenga una buena resistencia mecánica para lograr un fácil hincado y una buena protección contra la corrosión, con lo que se obtiene una larga duración.

- **Efecto de la forma del electrodo:** Por lo visto la mayor caída de potencial ocurre en las proximidades del electrodo, dado que la densidad de corriente es mayor (menor sección de conducción) por lo que para obtener una baja resistencia total, el electrodo deberá diseñarse de forma tal que provoque una rápida disminución de la densidad de corriente en función de la distancia al electrodo. Esta condición se logra haciendo que las dimensiones en una dirección sean preponderantes comparadas con las otras dos, es decir, un caño, barra o cinta tienen una resistencia mucho menor que una placa de igual superficie.

La resistencia **no es inversamente proporcional a la superficie del electrodo**, se expresan por la siguientes fórmulas:

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

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

Donde:

- R = resistencia [Ω]
- ρ = resistividad [$\Omega \cdot m$]
- A = área total de la placa en cm^2
- L = longitud [cm]
- r = radio [cm]

Aplicando estas fórmulas obtenemos:

Tipo de electrodo	Placa	Jabalina
Características	Espesor 2 mm cobre	$\varnothing = 1/2''$ r= 0.6 cm Copperweld
P = 1500 $\Omega \cdot m$	Superficie total	Profundidad (superficie)
R = 3 Ω	4,91 m^2	5,78 m (0,22 m^2)
R = 5 Ω	1,66 m^2	3,18 m (0,12 m^2)
P = 5000 $\Omega \cdot m$	Superficie total	Profundidad (superficie)
R = 5 Ω	19,63 m^2	12,02 m (0,48 m^2)
R = 10 Ω	4,91 m^2	5,78 m (0,22 m^2)

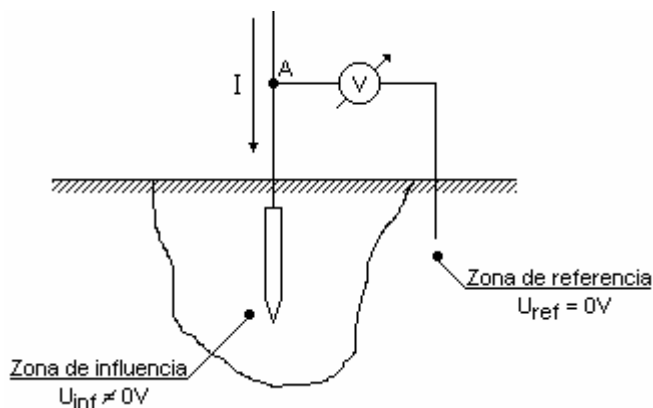
Comparando placas con jabalinas, se observa que para obtener el mismo valor de resistencia eléctrica en el mismo suelo, la jabalina es más económica que la placa, además de que su costo de instalación es despreciable frente a la placa.

- Efecto de la profundidad del electrodo
- Efecto de la humedad del suelo
- Efecto de la temperatura del suelo

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Principio del método de medida:

A una cierta distancia de la toma de tierra, la densidad de corriente es prácticamente nula (la sección de conducción tiende a infinito) a partir de este punto, sea cual sea la corriente que circula por el electrodo, el potencial es nulo.



Existe alrededor de cada toma de tierra una zona de influencia, cuyo potencial es distinto de cero y una zona de referencia de potencial nulo.

Con el voltímetro medimos la diferencia de potencial:

$$\Delta U = U_A - U_R$$

Y como $U_R = 0$, tenemos $\Delta U = U_A$.

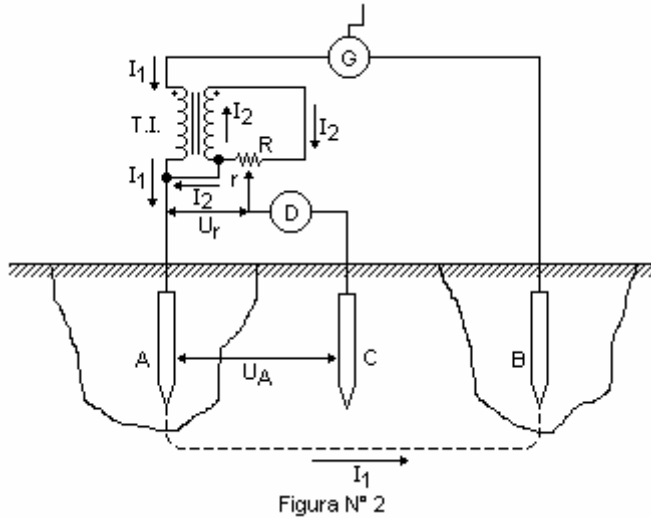
Es decir la lectura del instrumento nos da el potencial de la toma de tierra.

Si conocemos la corriente que circula por el electrodo podemos calcular el valor de la

resistencia:

$$R_T = \frac{U_A}{I}, \quad U_A \text{ se denomina tensión con relación a tierra}$$

El instrumento a utilizar en la practica usa 2 sondas o tierras auxiliares, una denominada de “inyección de corriente” a fin de formar un circuito cerrado con la tierra a medir y la otra llamada toma de referencia porque se ubica en la zona de potencial cero entre las dos tierras, el esquema basico, basado en el método de compensación de Eggherend se muestra en la figura N° 2.



A: tierra a medir
B: sonda de inyección de corriente
C: sonda de referencia

El generador a manivela G hace circular una corriente alterna I_1 por la tierra a medir (A) y por la toma auxiliar (B). En este mismo circuito ésta conectado el bobinado primario del transformador de intensidad TI en cuyo secundario se encuentra la resistencia R por la que circula la corriente I_2 .

Deslizando el contacto móvil sobre la resistencia R encontramos un punto en

el cual el detector D no acusa circulación de corriente y se cumple:

$$U_A = U_R \quad \text{Siendo } U_A \text{ la tensión con relación a la tierra de la toma de tierra A}$$

O sea:

$$I_2 r = I_1 R_A \Rightarrow R_A = \frac{I_2 r}{I_1}$$

Si se cumple que $I_1 = I_2$, es decir la relación de transformación del TI es uno, tenemos que:

$$R_A = r$$

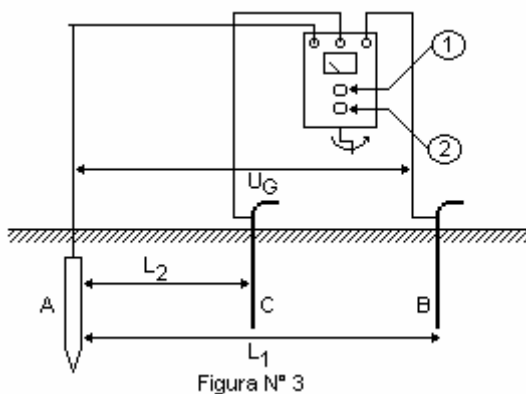
El valor leído en el instrumento da directamente la resistencia buscada.

La resistencia de la toma auxiliar B no interviene en la medición, solo determina la sensibilidad del instrumento. Tampoco la sonda C, tiene importancia porque no circula corriente por ella en el momento de la compensación.

También se podría haber calculado el valor de R_A midiendo U_A e I_1

$$R_A = \frac{U_A}{I_1}$$

Realización practica.



1. Clavar las tomas auxiliares B y C a las distancias $L_1 = 20$ m; $L_2 = 10$ m respectivamente de la tierra a medir A (o distancias proporcionales)
2. Regar el terreno alrededor de cada toma auxiliar con agua salada
3. Girar la manivela del generador a una velocidad aproximada a 160 rpm
4. Girar el selector de alcance (1) y el potenciómetro (2) hasta que el galvanómetro indique cero (0).

5. En este momento se obtiene el valor de la resistencia de la toma de tierra, multiplicando, el alcance por el valor indicado en el potenciómetro.

B) RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad es la magnitud que caracteriza eléctricamente al suelo o terreno. Es el elemento que determina el valor de la resistencia de la toma de tierra y establece sus dimensiones superficiales, longitudinales y de empotramiento.

Sus unidades son ($\Omega \cdot m$) ($\Omega \cdot cm^2/m$) y equivale a la resistencia que presenta al paso de una corriente eléctrica un cubo de terreno de un (1) m de arista.

La resistividad del terreno es muy variable, pues el mismo no es homogéneo, las variaciones de un punto a otro pueden ser apreciables, esto motiva que el verdadero valor de la resistividad solo se conoce cuando se realiza la medición. Las tablas dan valores aproximados.

Además las variaciones de la resistividad con el tiempo obligan a efectuar mediciones periódicas una vez hecha la toma de tierra para verificar las condiciones de esta en función de los posibles cambios de la resistividad.

La variación de la resistividad se debe a los siguientes factores:

1. Composición del terreno:

Según la naturaleza de las rocas, su formación, granulometría, composición química y mineral.

2. Humedad

La corriente eléctrica a través del terreno resulta muy variable con la presencia del agua. La resistividad es elevada en suelos secos y disminuye apreciablemente en suelos húmedos, la siguiente tabla muestra la variación de la resistividad en función del contenido de humedad a temperatura constante.

Contenido de humedad % en peso	Resistividad ($\Omega \cdot m$) Suelo superficial o de labor	Resistividad ($\Omega \cdot m$) Suelo arcillo - arenoso
0	1000×10^4	1000×10^4
2,5	25×10^2	15×10^2
5	16×10^2	$4,3 \times 10^2$
10	5×10^2	$1,9 \times 10^2$
15	$1,9 \times 10^2$	$1,05 \times 10^2$
20	$1,2 \times 10^2$	$6,3 \times 10$
30	$6,4 \times 10$	$4,2 \times 10$

A partir del 30 % de humedad solo se logra una leve disminución de la resistividad.

Cuando aumenta la resistividad del terreno también aumenta la resistencia de la toma de tierra.

3. Temperatura

La resistividad es prácticamente constante a temperaturas superiores a $0^\circ C$, por debajo de esta se produce el congelamiento del agua del terreno, disminuyendo bruscamente su componente de humedad y por consiguiente aumenta la resistividad. La siguiente tabla muestra la variación de la resistividad en función de la temperatura a humedad constante.

Temperatura $0^\circ C$	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
20	72
10	99
00 (agua)	138
0 (hielo)	300
-5	790
-15	3300

4. Profundidad

La resistividad del terreno en las capas superficiales varía mucho de acuerdo a las distintas estaciones del año. Así es que con hielo o extrema sequedad esta aumenta y con humedad disminuye notablemente. Este fenómeno es apreciable hasta 1 m de profundidad aproximadamente.

Dado que la humedad y la temperatura son mas estables a medida que aumenta la profundidad en el terreno, se deduce que un sistema de puesta a tierra será tanto mas efectivo y estable en cualquier época del año cuanto mas profundo estén hincados sus electrodos. Cuando se puede alcanzar con el electrodo la capa freática (12 –24 m) la resistividad de la puesta a tierra es baja y estable.

Cuando no se consigue este objetivo se hace necesario emplear métodos artificiales para mejorar la resistividad del suelo. Por ejemplo agregando bentonita, carbonilla o modernamente algún gel.

Realización practica:

- Medición de la resistividad del terreno por el método de los cuatro electrodos

El instrumento que usaremos en la practica se muestra en la figura N° 1, y el circuito completo en la figura N° 2.

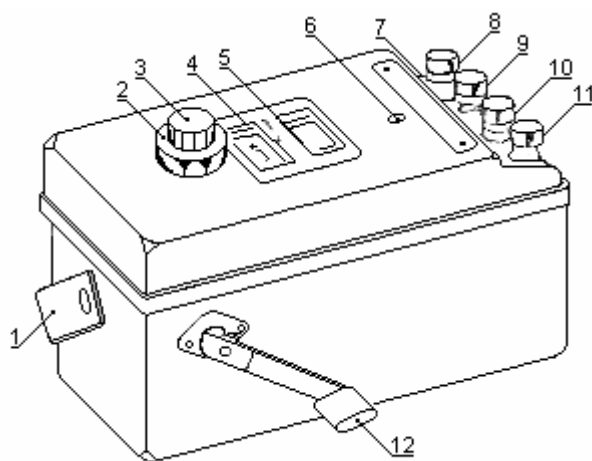


Figura N° 1

1. Correa para transportarlo, 2. Potenciómetro, 3. Selector de rango, 4. Escala del potenciómetro, 5. Escala del galvanómetro, 6. Ajuste del cero, 7. Placa para cortocircuitar terminales, 8-9-10-11. Terminales de conexión, 12. Manivela para accionar el generador

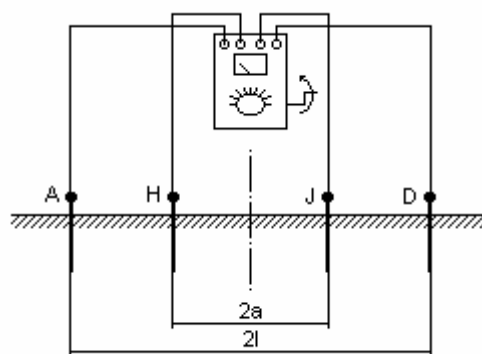


Figura N° 2

Como se analizará detalladamente en teoría, si se aplica con un generador de c.a. una tensión a las estacas exteriores A-D, circula una intensidad de corriente entre éstas a través del suelo.

Mediante las sondas H-J se mide la resistencia del terreno comprendido entre las mismas es decir en el instrumento obtendremos el valor R_{HJ} .

El modo de operar es el siguiente:

- 1 Clavar las estacas en el terreno a las distancias especificadas en el instrumento; $2a = 30m$ y $2l = 60m$ o proporcionales.
- 2 Girar la manivela del generador a una velocidad aproximada de 120 a 180 rpm.
- 3 Girar el selector de alcance y el potenciómetro hasta lograr que el galvanómetro indique cero (0).
- 4 Leer el valor indicado en la escala del potenciómetro y multiplicarlo por el rango utilizado. El valor obtenido indica la resistencia del tramo H-J en ohm.
- 5 Calcular el valor de la resistividad aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho = R_{\text{HJ}} \cdot \frac{\pi \cdot (l^2 - a^2)}{2a} [\Omega \cdot \text{m}]$$