

Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos

Mediciones Eléctricas II (3D2)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electromecánica – Facultad de Ingeniería – UNMdP

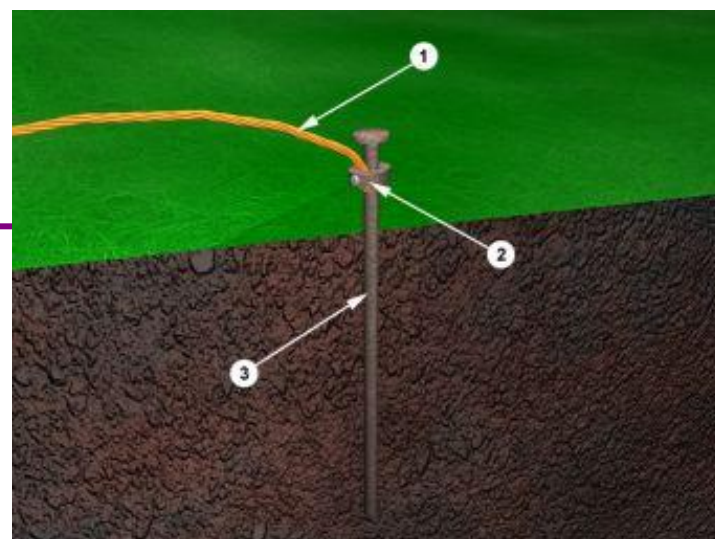
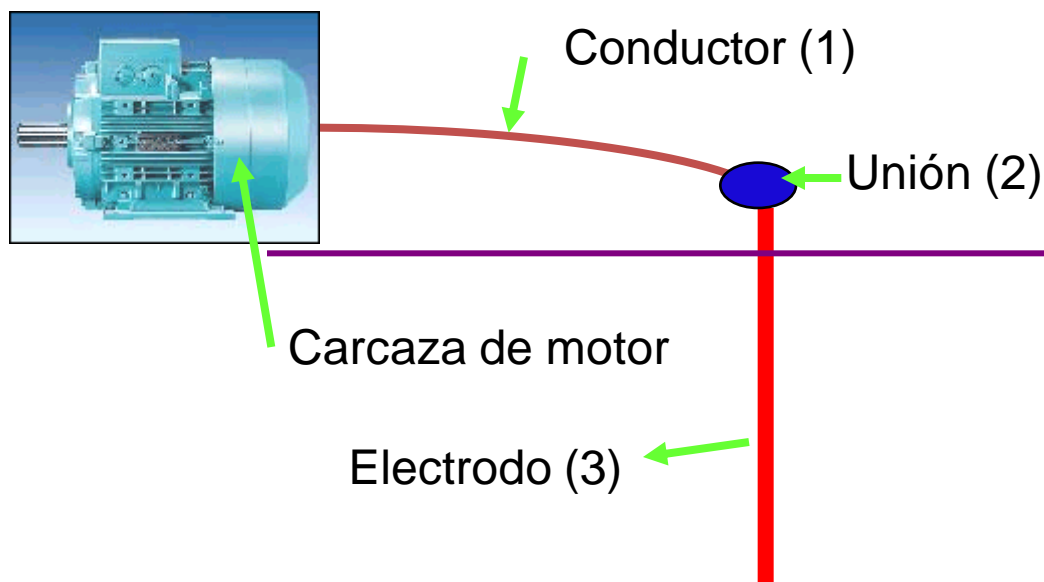
(Cursada 2018)

Introducción

- ¿Que es una puesta a tierra?

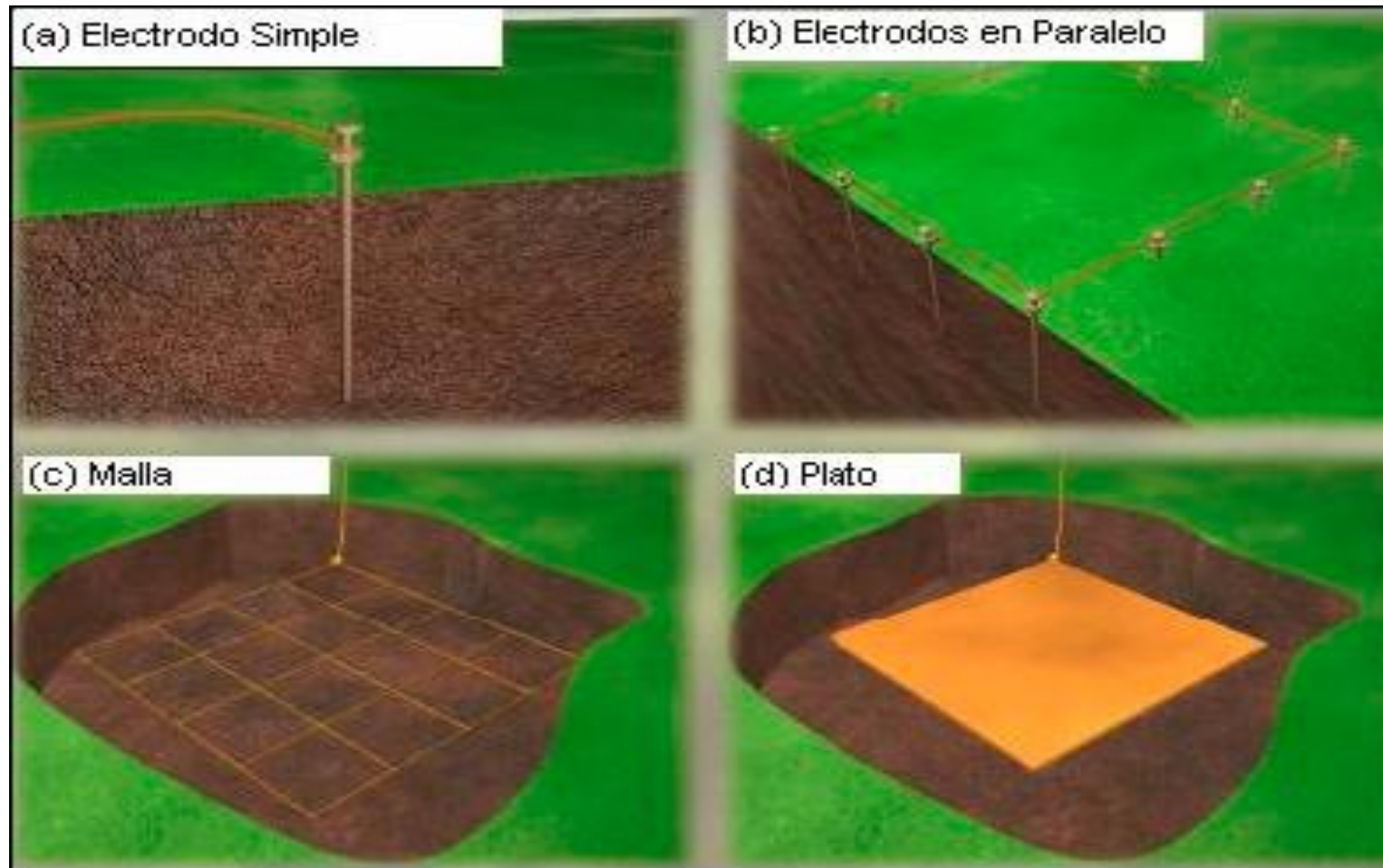
Una puesta a tierra (p.a.t.) es una ligazón o enlace metálico directo, sin fusibles ni protección, entre partes de una instalación eléctrica y uno o varios electrodos enterrados en el suelo con el objeto de eliminar diferencias de potencial peligrosas y derivar corrientes de defectos o atmosféricas al suelo.

Ejemplo:



Introducción

- Ejemplos de disposiciones de puestas a tierra

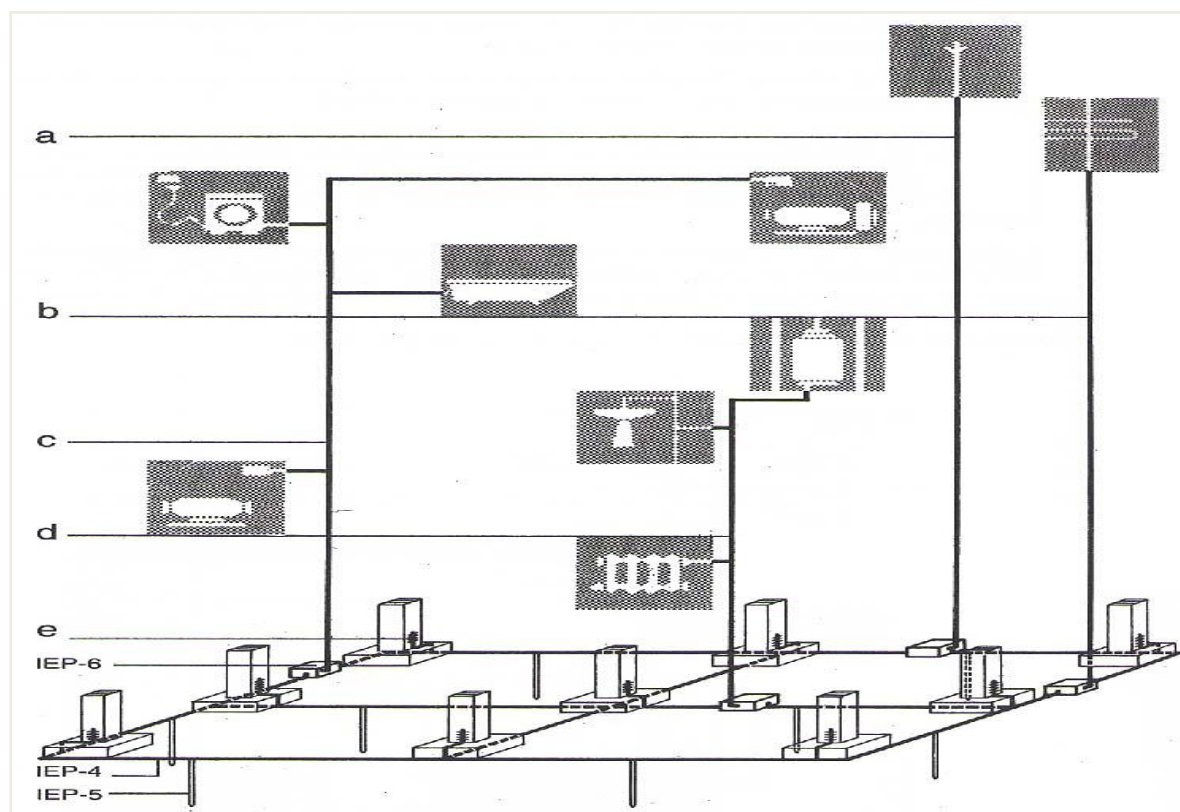


Introducción

- La puesta a tierra tiene doble misión:

ESTATICA: Fijar un potencial de referencia para máquinas y equipos

DINAMICA: Dirigir a tierra corrientes pequeñas o elevadas para protección de personas expuestas al peligro de contacto.

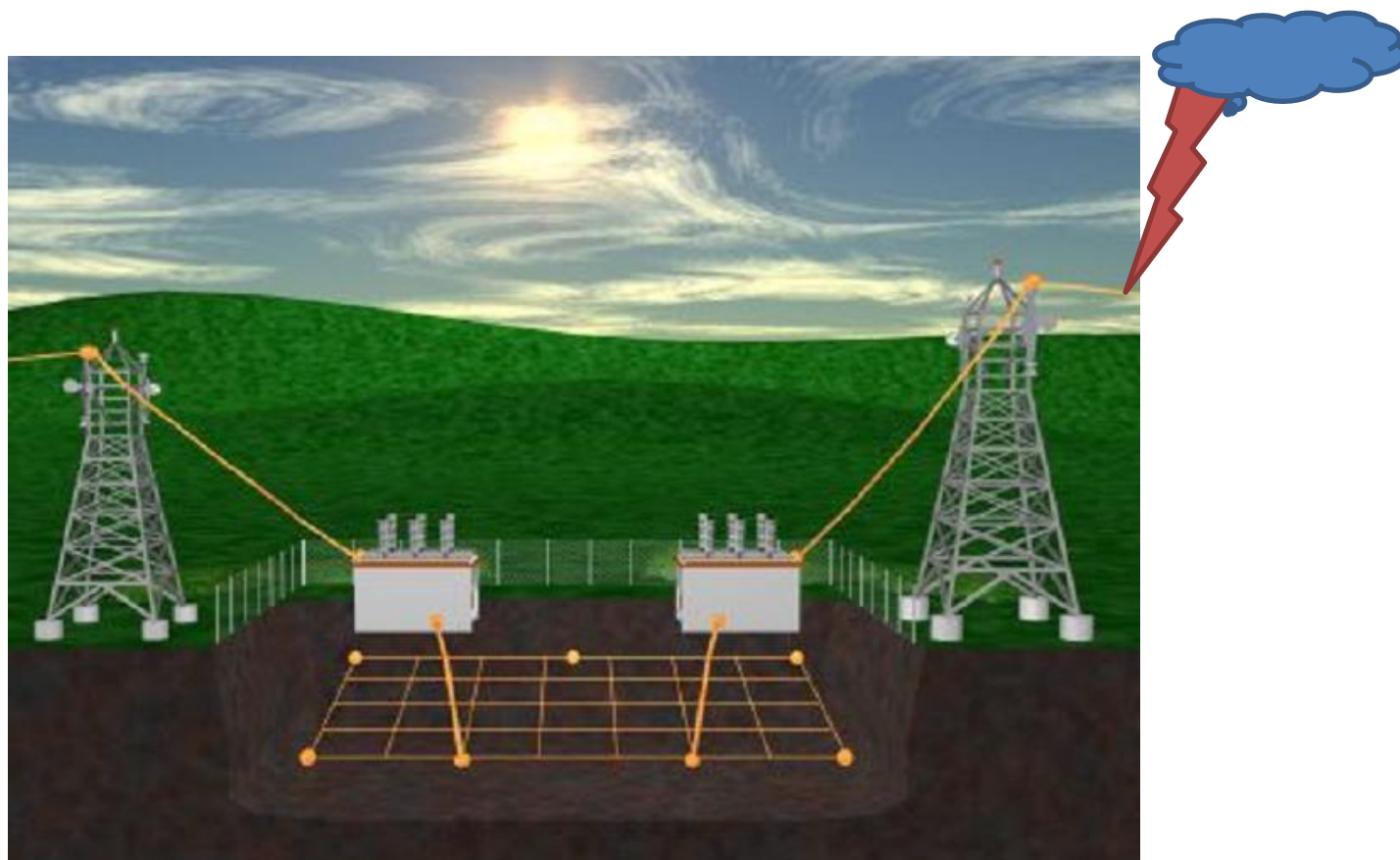


Esquema global de p.a.t. en edificios

Introducción

Función Dinámica de una PAT:

- Disipa descargas eléctricas de origen atmosférico en líneas de transmisión.

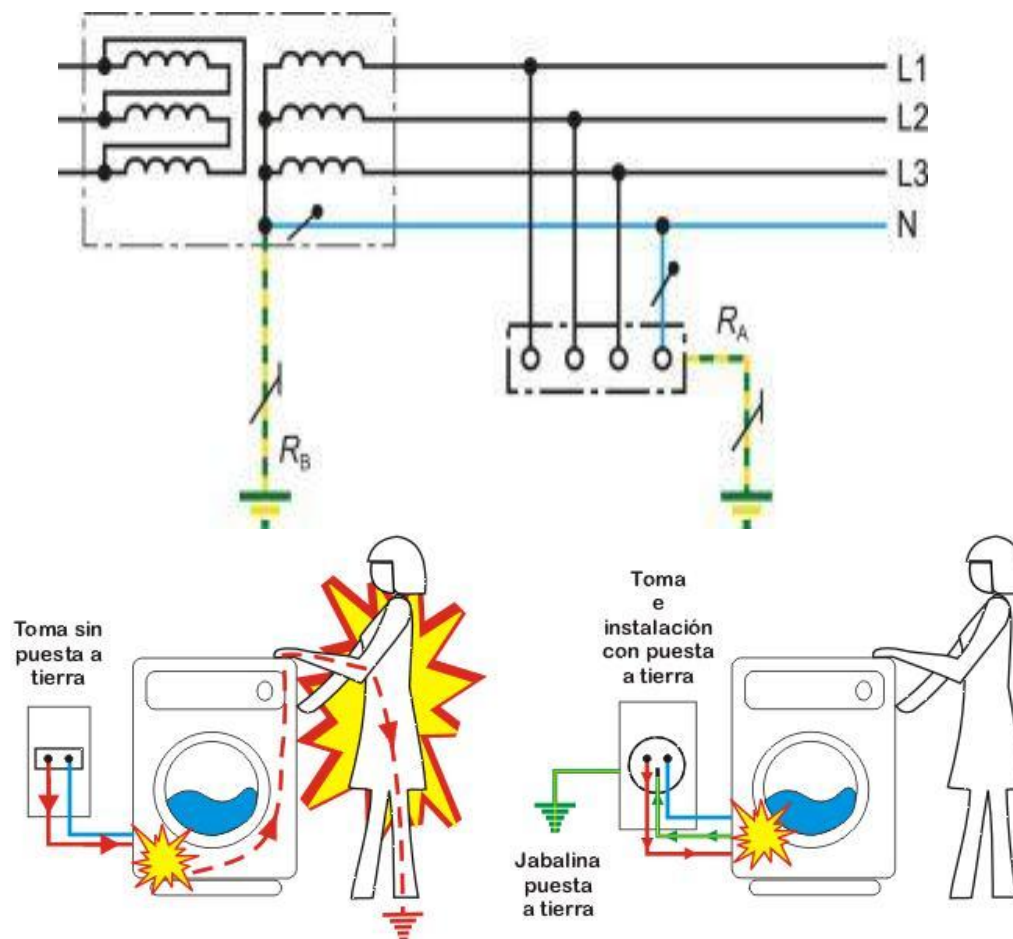


Introducción

Función Dinámica de una PAT:

- Descarga a tierra corrientes de defecto.

Ejemplo sistema TT



Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra vs Resistividad de terreno

Resistencia de puesta a tierra (R_{PAT}) : Es la resistencia eléctrica de un electrodo o sistema de electrodos de puesta a tierra entre su borne de conexión y el suelo eléctricamente neutro (teóricamente un punto en el infinito). Se mide en Ω .

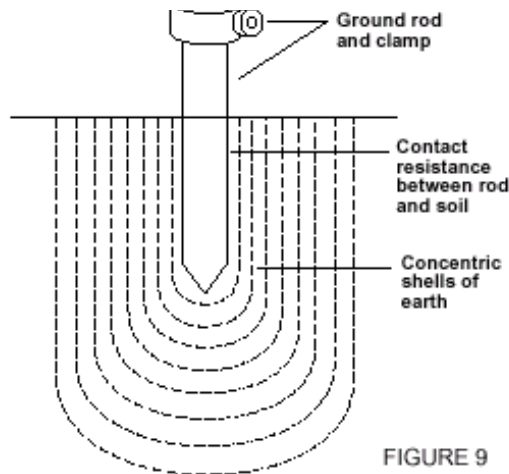
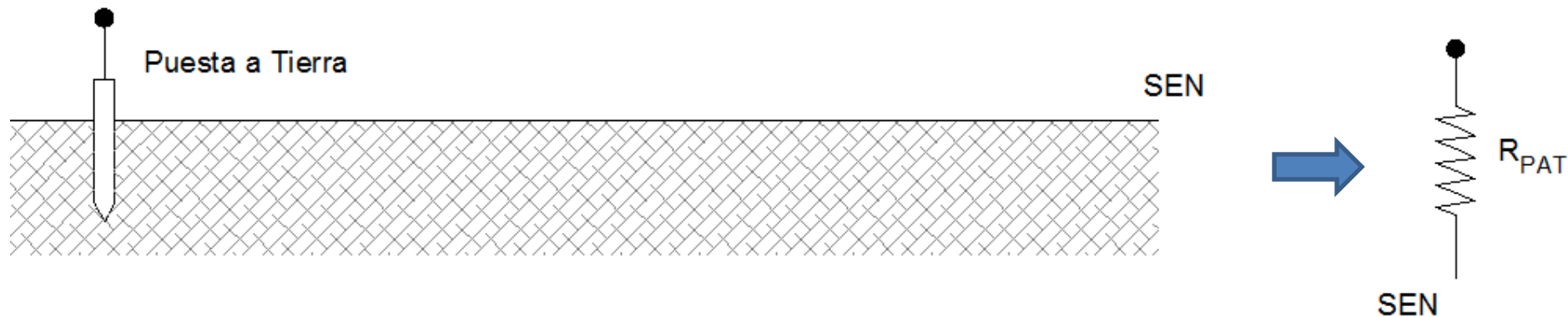


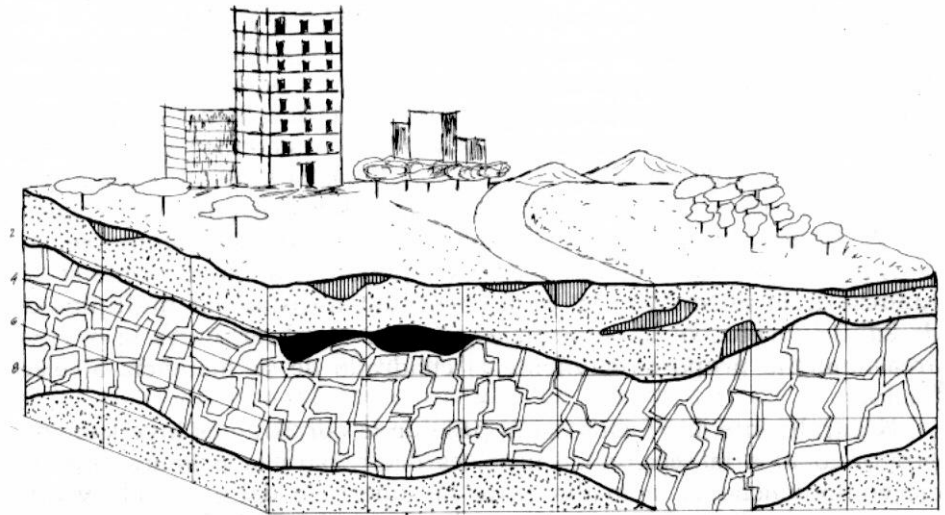
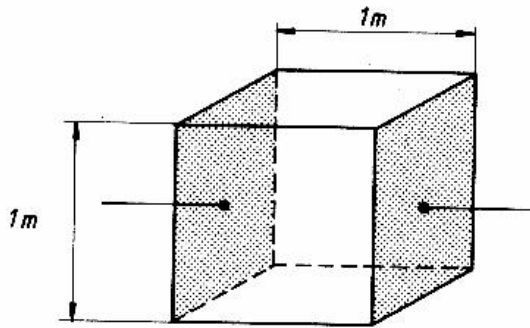
FIGURE 9

Tiene 3 componentes:

1. Resistencia propia del electrodo y sus conexiones.
2. Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo adyacente
3. Resistencia del terreno alrededor del electrodo

Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra vs Resistividad de terreno

Resistividad de suelo (ρ): Es una propiedad del terreno. Es la resistencia eléctrica de un cubo de suelo de un metro de arista entre dos caras paralelas. Se mide en Ωm .



Depende de los sig. factores :

Composición del terreno
 Concentración de sales disueltas
 Contenido de humedad
 Temperatura

$$R = \rho \frac{1}{s}$$

$$\rho = R \frac{s}{1} \quad [\Omega m]$$

Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra vs Resistividad de terreno

Resistencia de puesta a tierra. Mide la eficiencia de un sistema de electrodos enterrados en términos de resistencia. Ohms (barra, jabalina, malla etc.)

Sirve para:

Determinar la resistencia actual de las conexiones a tierra
Verificar la necesidad de cambios o un nuevo sistema de puesta a

tierra.

Determinar las tensiones de contacto y las tensiones de paso
Diseñar protecciones para el personal y circuitos.

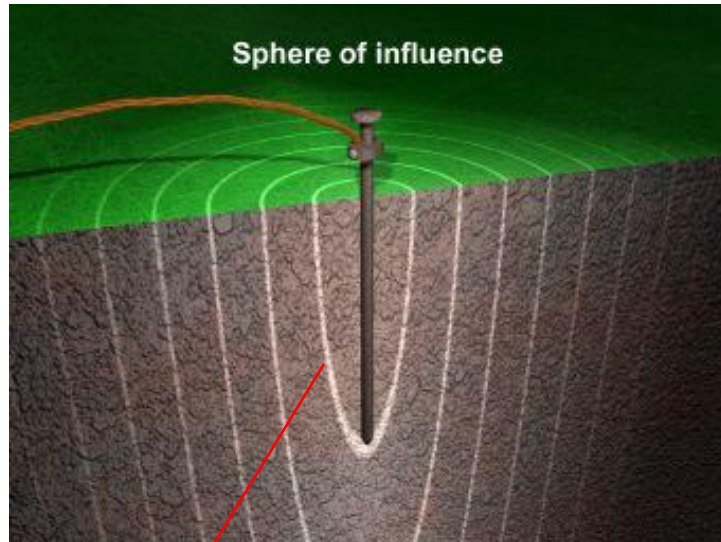
Resistividad de suelo . Propiedad eléctrica del suelo. Ohms x mts.

Sirve para: Cálculo de la puesta a tierra.

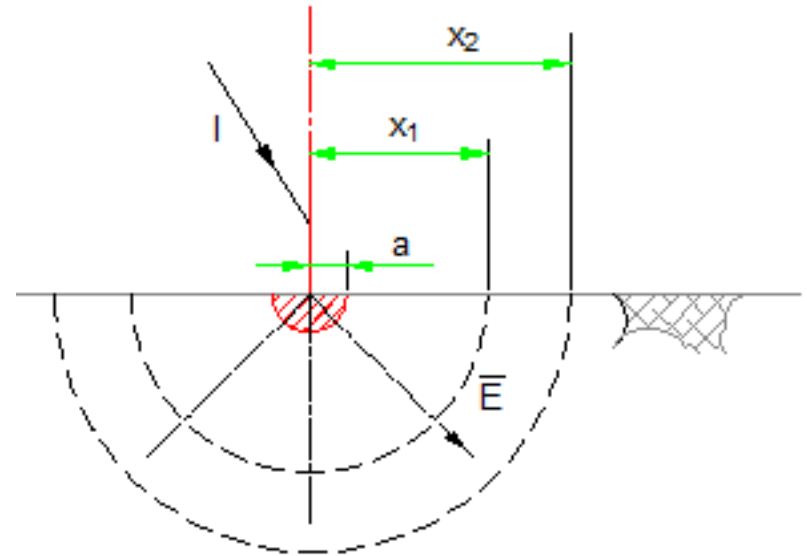
Cálculo del gradiente de potencial. Tensión de contacto y paso

Cálculo de acoplamiento inductivo entre circ. Elec. y comunicaciones

Gradiente de potencial alrededor de un electrodo de puesta a tierra:



Superficie equipotencial



Modelo:

- Electrodo semiesférico de radio " a "
- Suelo isotropo (mismas características físicas en cualquier dirección) y homogéneo (misma composición en cualquier dirección)

Gradiente de potencial alrededor de un electrodo de puesta a tierra:

$$E_r = \rho * \delta \longrightarrow \text{Ley de Ohm microscópica}$$

$$\delta = \frac{I}{2\pi r^2} \longrightarrow \text{Densidad de Corriente}$$

$$\rho \longrightarrow \text{Resistividad}$$

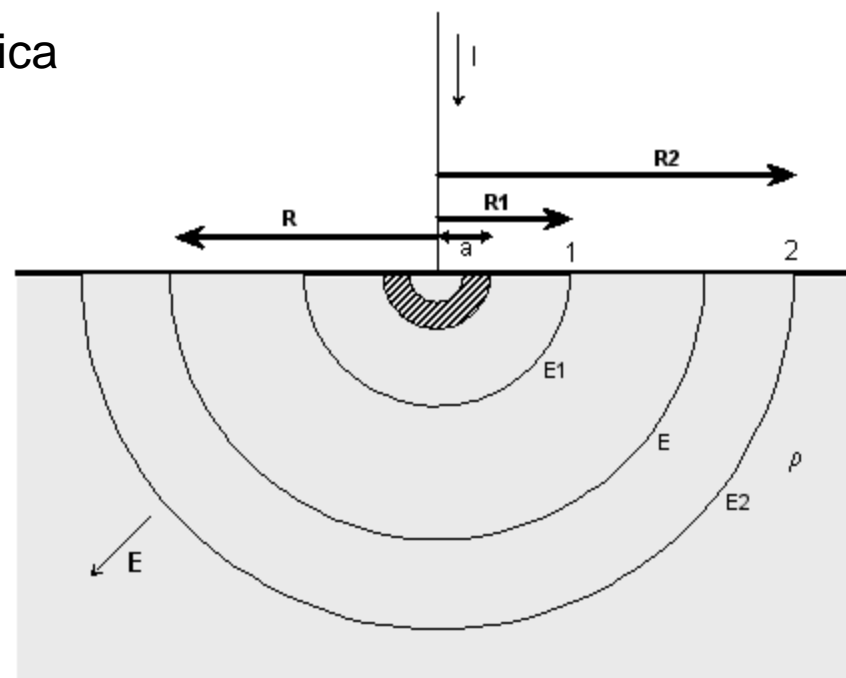
La diferencia de potencial ΔV será:

$$dU = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I}{2\pi r^2} \rho dr$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \quad \text{Si } R_2 \rightarrow \infty \text{ y } r_1 = a \text{ (radio del electrodo)}$$

El potencial del electrodo $\longrightarrow V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} \right) \longrightarrow$ El valor de la Resistencia de Tierra será:

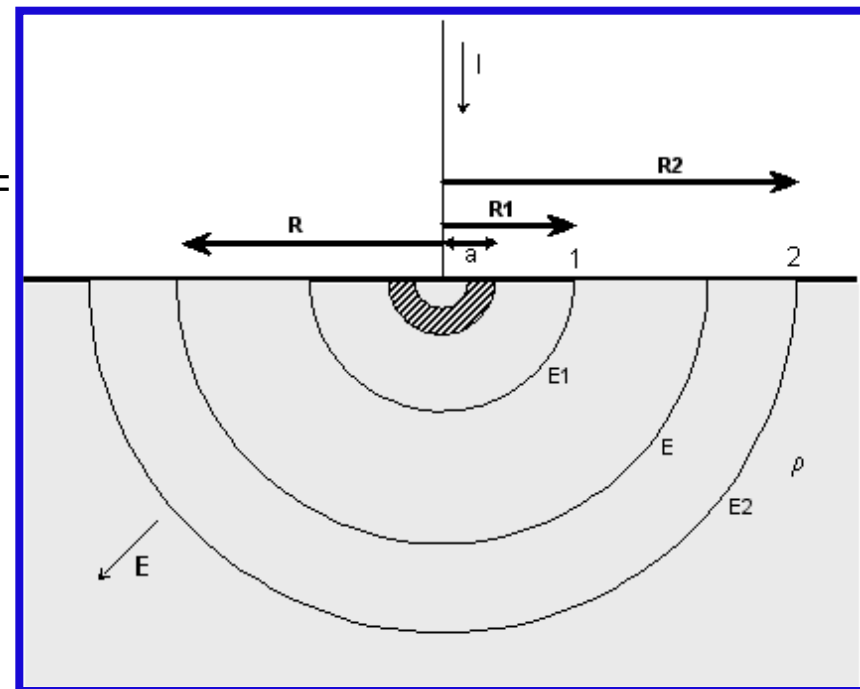
$$\frac{V}{I} = R_{PAT} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} \right)$$



Gradiente de potencial alrededor de un electrodo de puesta a tierra:

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

$$\frac{\Delta V}{I} = R_{r_1 r_2} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{dr}{r^2}$$



$$\gamma = \frac{dV}{dr} = \frac{\frac{I\rho}{2\pi} \frac{dr}{r^2}}{dr} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r^2} = \text{Grad. Potencial}$$

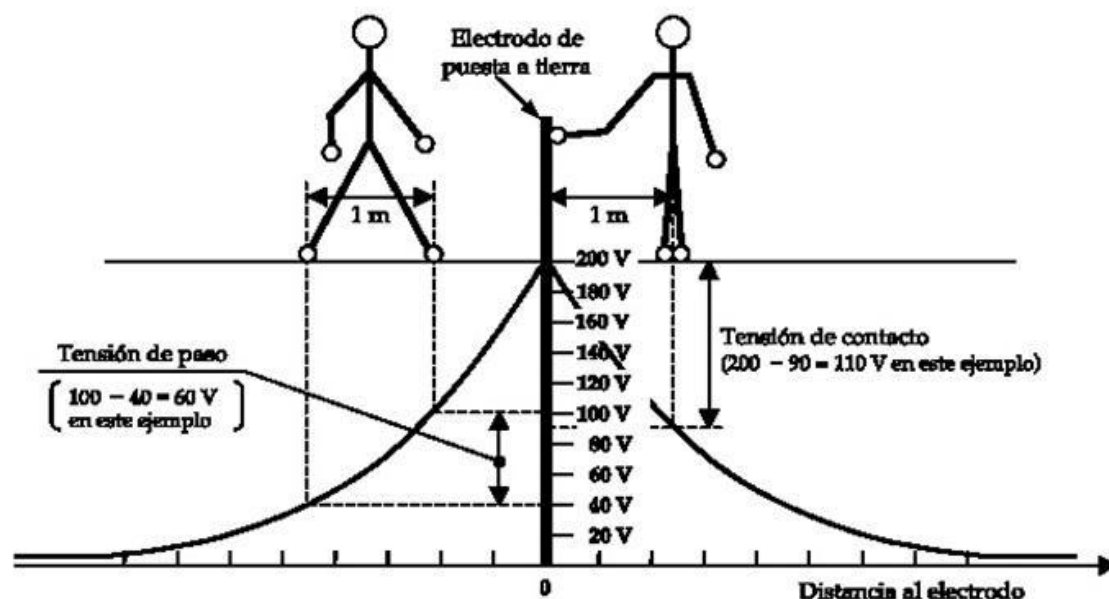
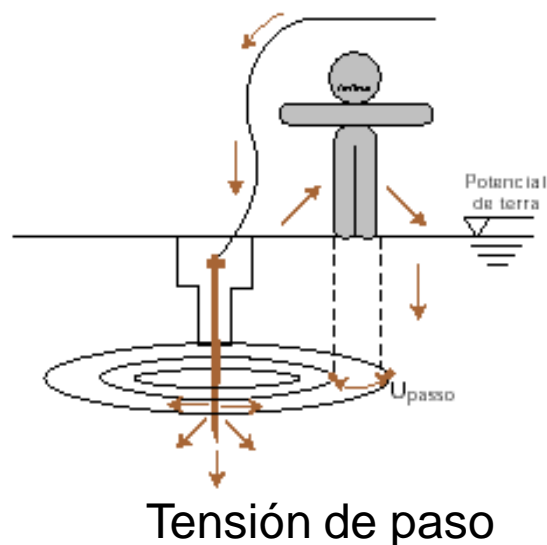
De aquí se observa que la corriente “I” va atravesando sucesivamente capas o conos cuyas resistencias decrecen con el cuadrado de la distancia. Por ello las capas de mayor radio contribuyen poco en la resistencia total, que dependerá esencialmente de las capas más próximas al electrodo.

Gradiente de potencial alrededor de un electrodo de puesta a tierra:

Conclusión:

La resistencia de tierra queda definida fundamentalmente por las primeras superficie equipotencial que envuelve al electrodo.

El 93% de la caída de tensión se produce en un radio de 1,8 m. alrededor del electrodo. El 80% de la caída de tensión se produce en un radio de 0,3 m. Es peligroso pisar en las proximidades de los electrodos.



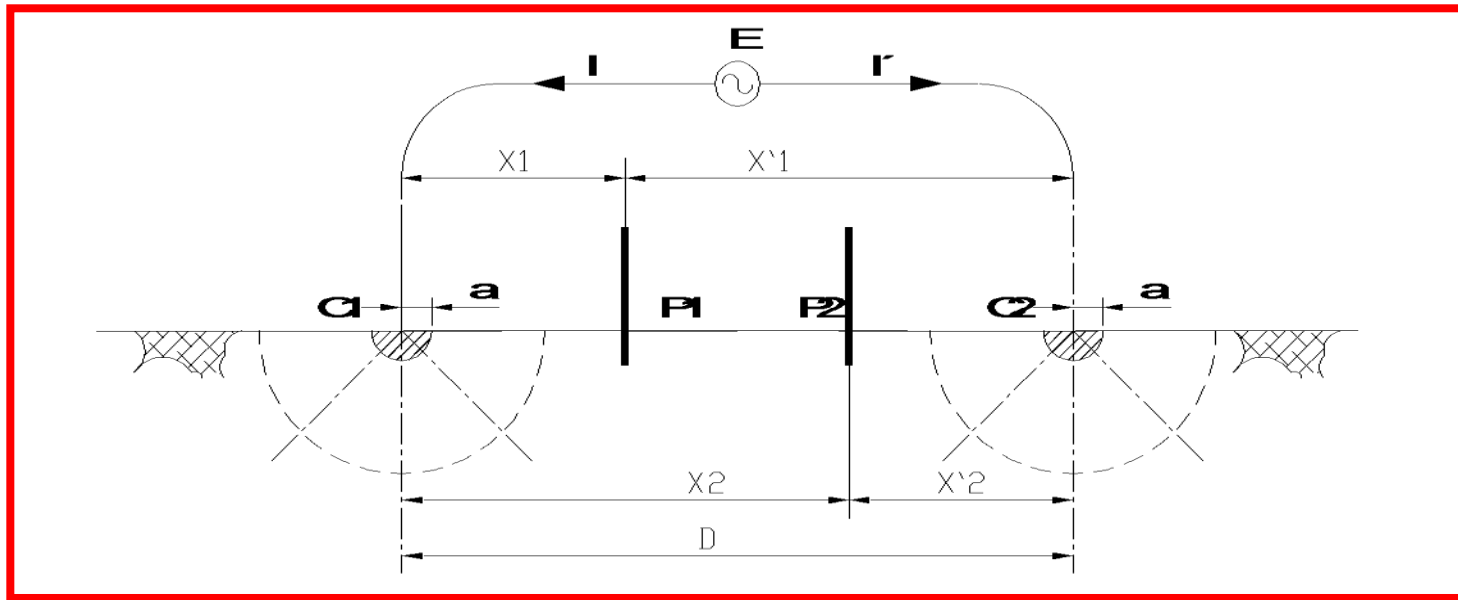
Teoría de la Medición de Puesta a Tierra y Resistividad de Suelo

Mediciones Eléctricas II (3D2)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electromecánica – Facultad de Ingeniería – UNMdP

(Cursada 2018)

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



$$I' = -I$$

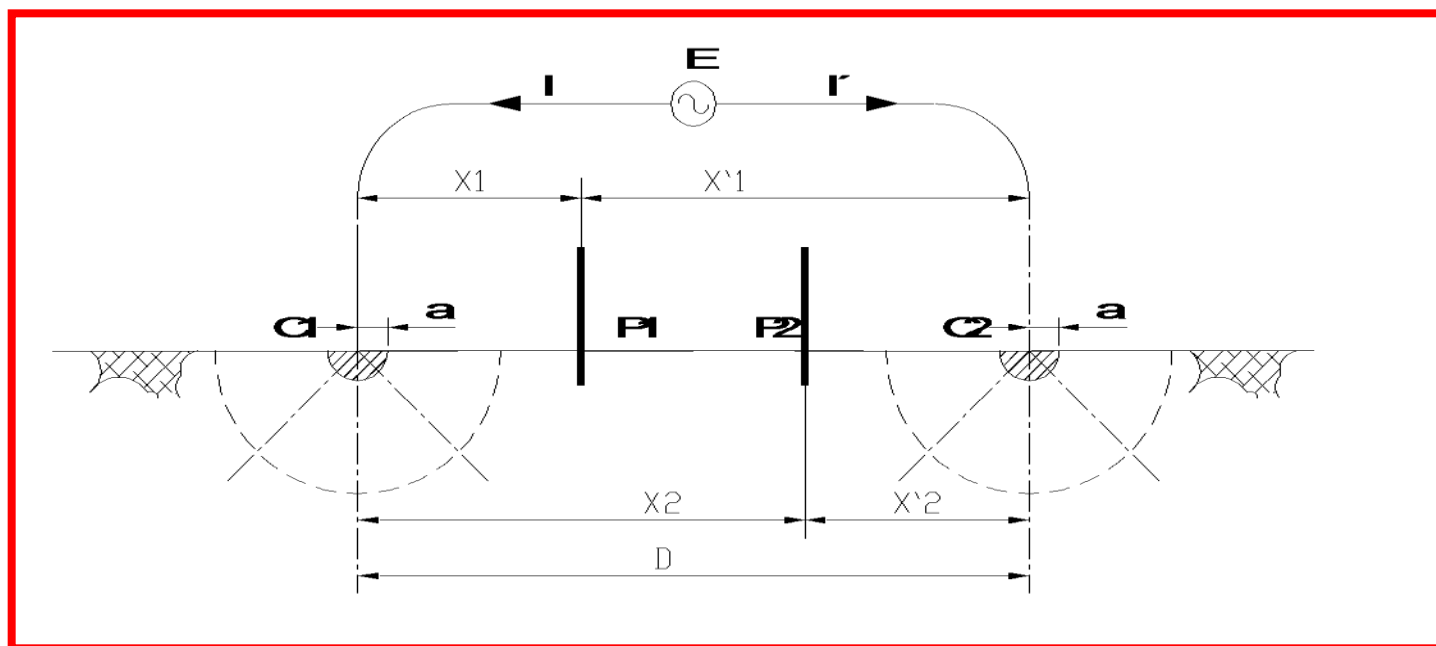
$$U_{P_1} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{X_1} \quad U'_{P_1} = \frac{\rho \cdot I'}{2\pi} \cdot \frac{1}{X'_1}$$

$$U_{P_2} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{X_2} \quad U'_{P_2} = \frac{\rho \cdot I'}{2\pi} \cdot \frac{1}{X'_2}$$

$$U_{TP_1} = U_{P_1} + U'_{P_1} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} \right)$$

$$U_{TP_2} = U_{P_2} + U'_{P_2} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X'_2} \right)$$

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



$$I' = -I$$

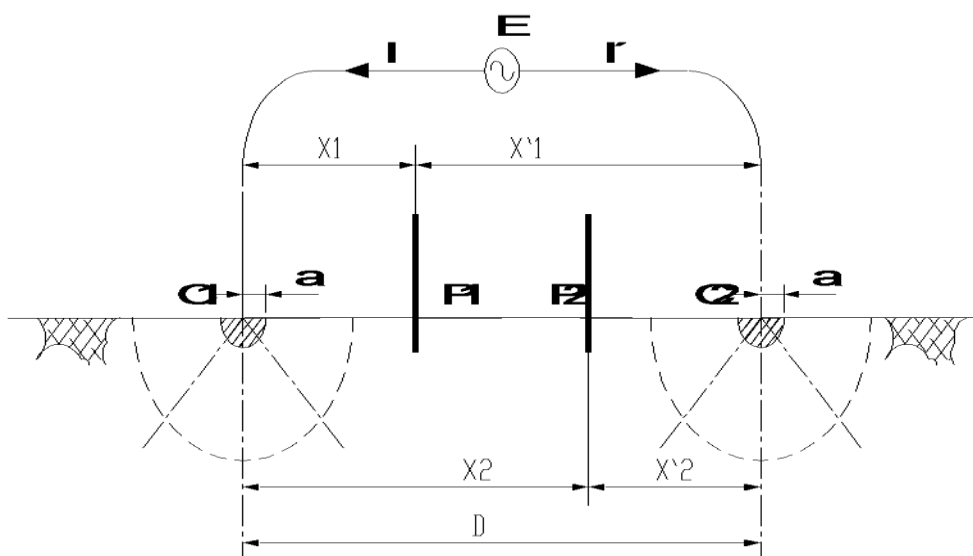
$$U_{TP_1} = U_{P_1} + U'_{P_1} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} \right)$$

$$U_{TP_2} = U_{P_2} + U'_{P_2} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X'_2} \right)$$

$$U_{P_1 P_2} = U_{12} = U_{TP_1} - U_{TP_2}$$

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} - \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X'_2} \right]$$

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} - \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X'_2} \right]$$

$$R_d = R_{PAT} = \frac{U_a}{I} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

Si P1 se conecta con C1

$$X_1 = a$$

$$X'_1 = D - X_1 = D - a$$

$$X'_2 = D - X_2$$

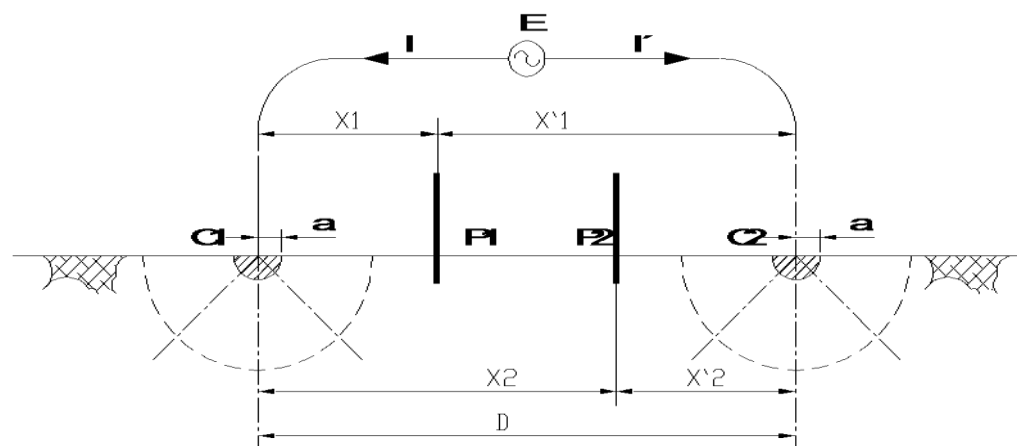
Si hacemos $X_2 = \alpha \cdot D$

Siendo $\alpha \leq 1$

Se tiene
$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{D - a} - \frac{1}{\alpha \cdot D} + \frac{1}{D - \alpha \cdot D} \right] =$$

$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{a} - \varepsilon_{(\alpha)} \right]$$

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



$$U_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{a} - \varepsilon_{(\alpha)} \right]$$

$$R_m = \frac{U_{12}}{I} = \left(\frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{a} \right) - \left(\frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \varepsilon_{(\alpha)} \right)$$

$$R_m = R_d - \Delta R_m$$

Para que $\Delta R_m \leq 0$

Debe $\varepsilon_{(\alpha)} \leq 0$

$$\varepsilon_{(\alpha)} = \left[\frac{1}{D-a} + \frac{1}{\alpha \cdot D} - \frac{1}{D-\alpha \cdot D} \right] = \left[\frac{1}{1-\frac{a}{D}} + \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{1-\alpha} \right] =$$

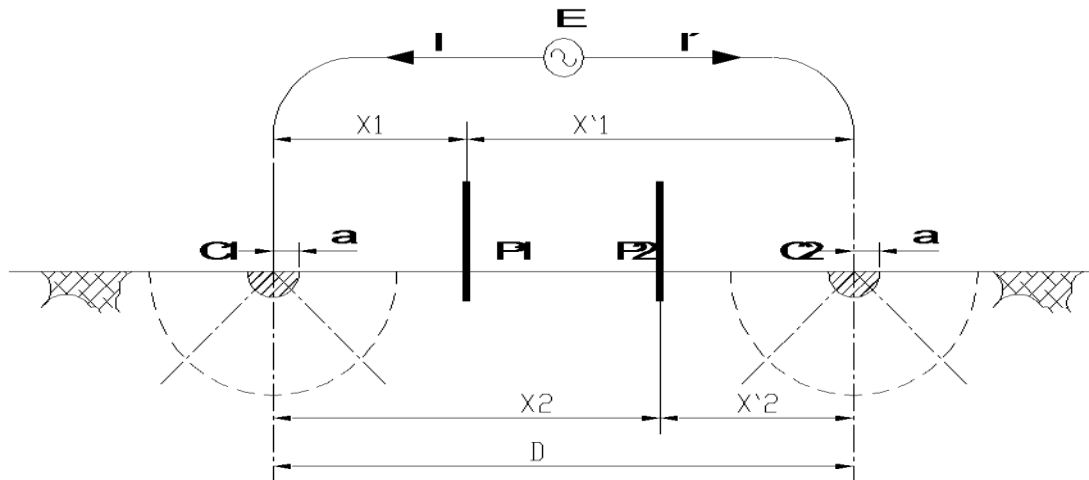
$$\alpha^2 + \alpha \left(1 - \frac{2}{K} \right) - \left(1 - \frac{1}{K} \right) = 0$$

Siendo

Ecuación de 2º grado

$$K = \frac{D}{a} \quad \alpha = \frac{X_2}{D}$$

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



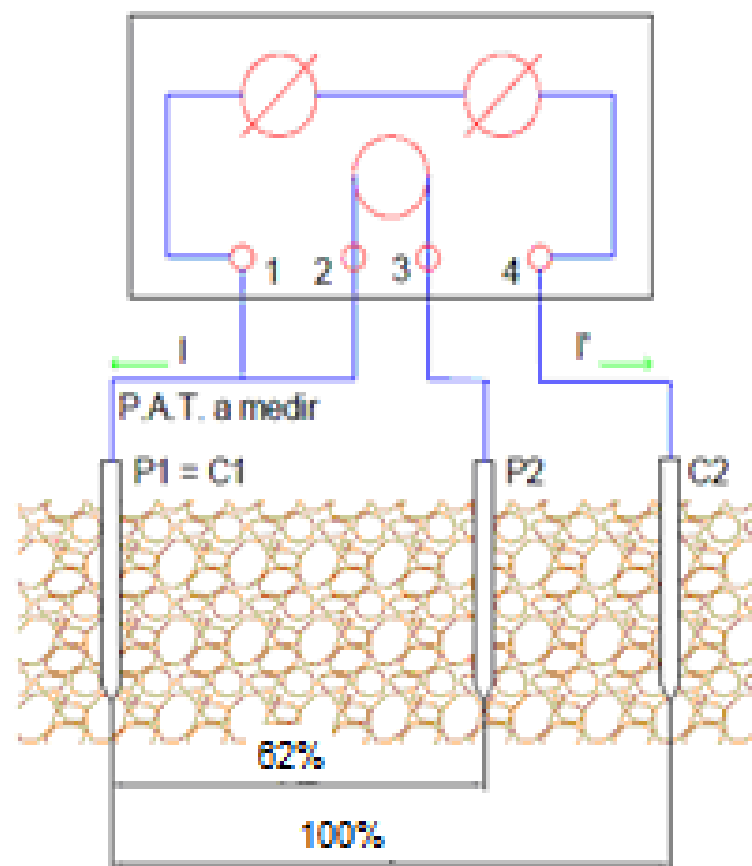
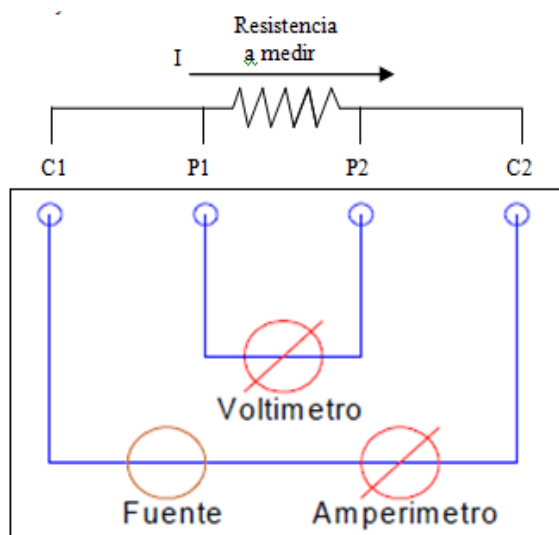
$$\alpha^2 + \alpha \left(1 - \frac{2}{K} \right) - \left(1 - \frac{1}{K} \right) = 0$$

Método del 62%
(ó método de la
caída de
potencial)

$K = \frac{D}{a}$	$\alpha = \frac{X_2}{D}$
1	1
2	0,707
5	0,643
10	0,629
1000	0,618
∞	0,618

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra

*Se mide con un instrumento llamado telurimetro:
(Los hay de 3 y de 4 bornes)*



Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra

Se mide con un instrumento llamado telurimetro:

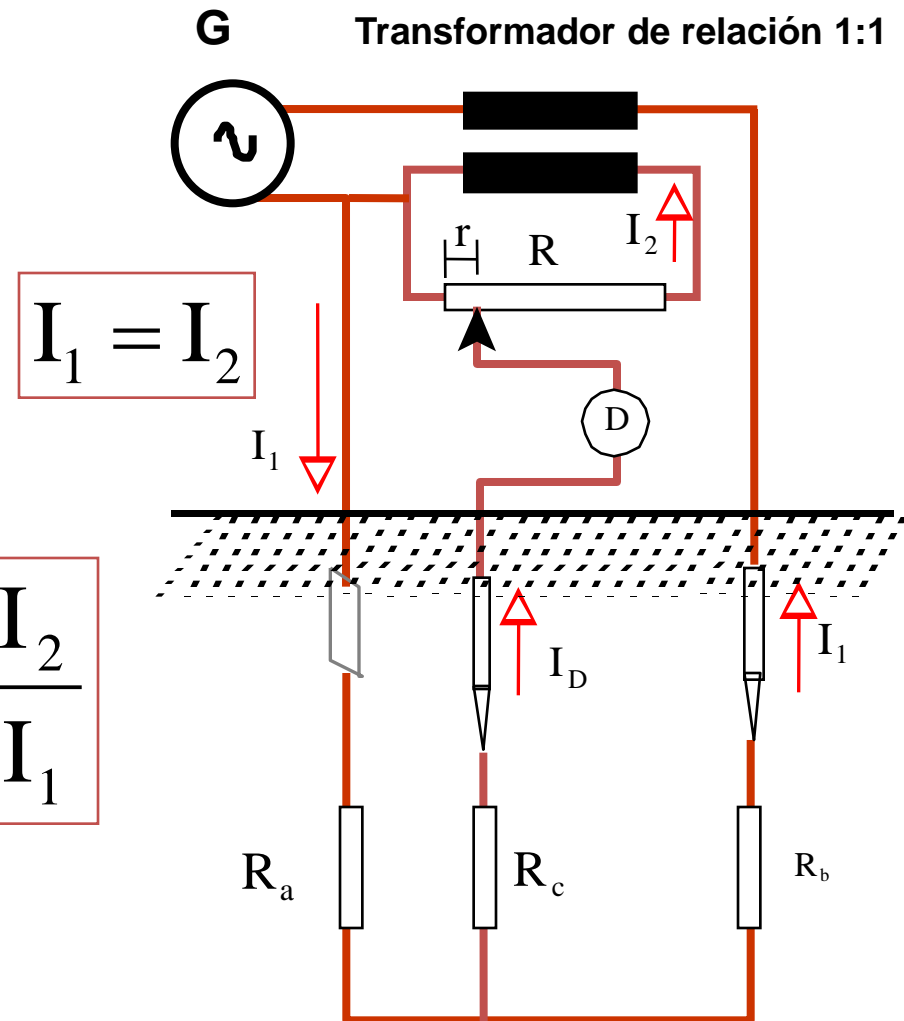


Cuando $D=0$:

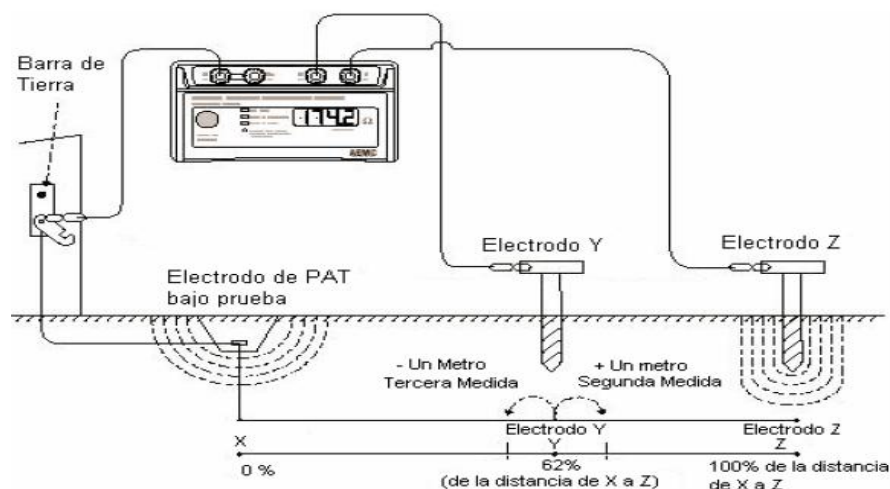
$$R_a I_1 = r I_2$$

$$R_a = r \frac{I_2}{I_1}$$

$$R_a = r$$

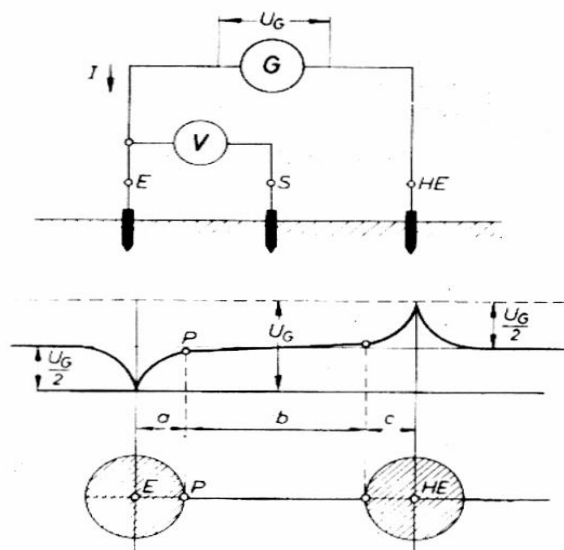


Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



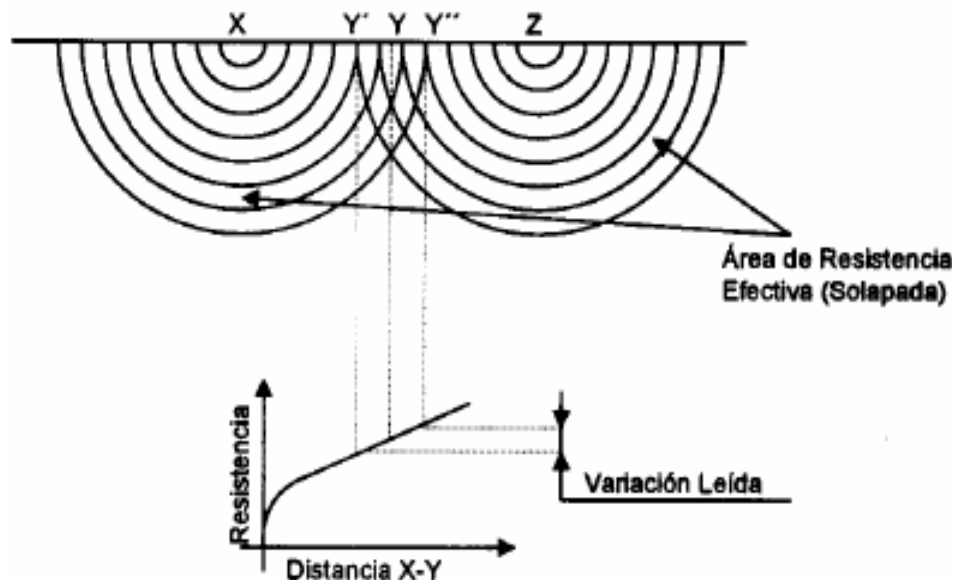
Método del 62%

- C1 y P1 están conectados mediante un puente.
- Se inyecta una corriente y se mide la tensión.
- Mediante la ley de Ohm se determina R.



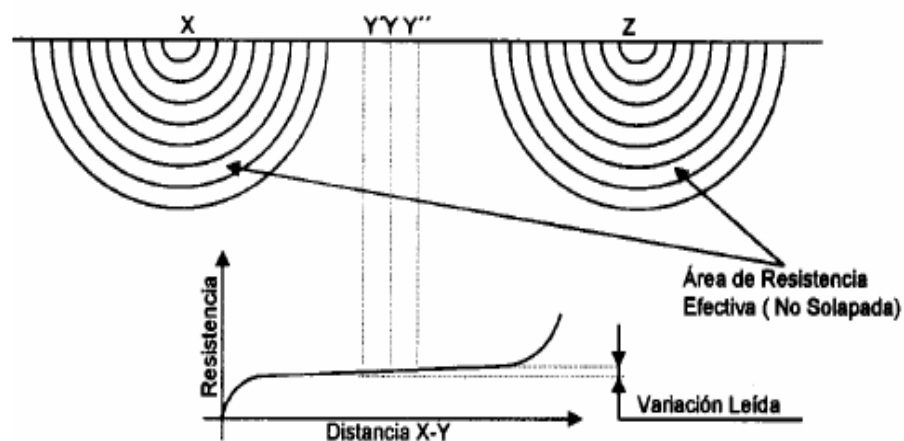
- 1) Desconectar del sistema todos los componentes
- 2) Determinar la distancia del electrodo de corriente
- 3) Realizar varias determinaciones de resistencia para distintas ubicaciones del electrodo de potencial.
- 4) Todos los electrodos se ubicaran en línea recta.
- 5) Graficar la curva de tensión hasta obtener una porción plana bien demarcada.

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra



En este caso los electrodos se encuentran muy cercanos entre si. Existe un solapamiento de los gradientes generados por cada electrodo.

La resistencia se incrementa como consecuencia de ello.



La distancia entre electrodos es suficiente como para no producir solapamiento de los gradientes. El valor de la R asociada al sector plano es el correcto.

Se lo denomina **zona de equilibrio**

Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra

Hay otros métodos además del 62%

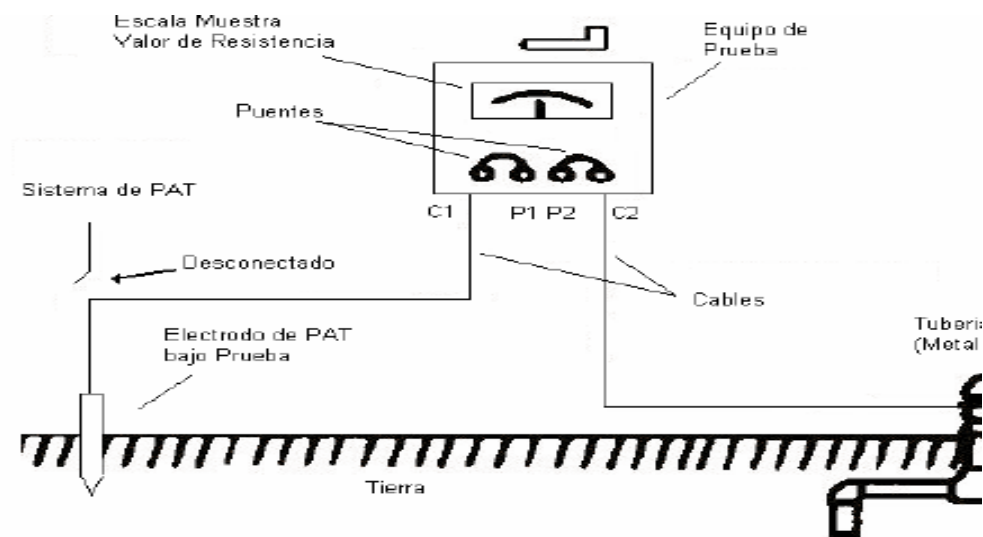
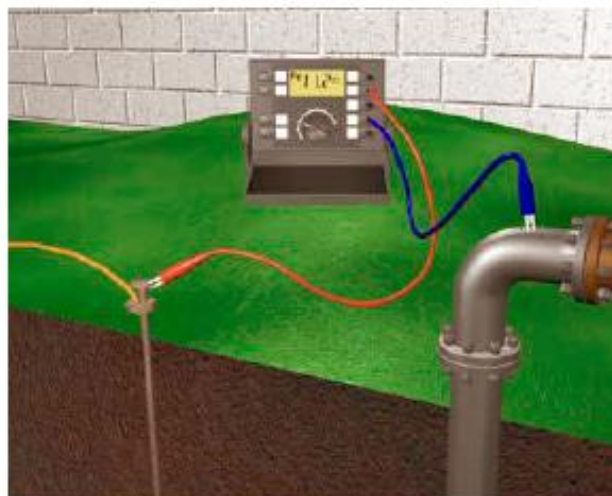
Método de los dos puntos:

Mide la resistencia del electrodo en estudio mas una auxiliar muy pequeña.

Sirve para sistemas donde existe tuberías metálicas (aprox. 1 Ohms)

La resistencia del electrodo no será superior a 25 Ohms.

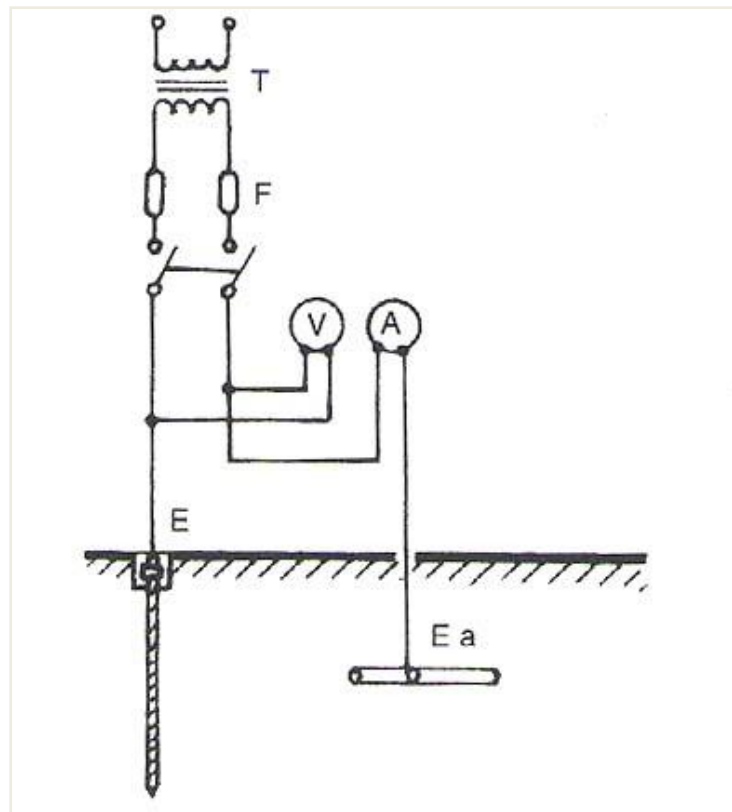
El método da una idea aproximada de la R del sistema.



Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra

Hay otros métodos además del 62%

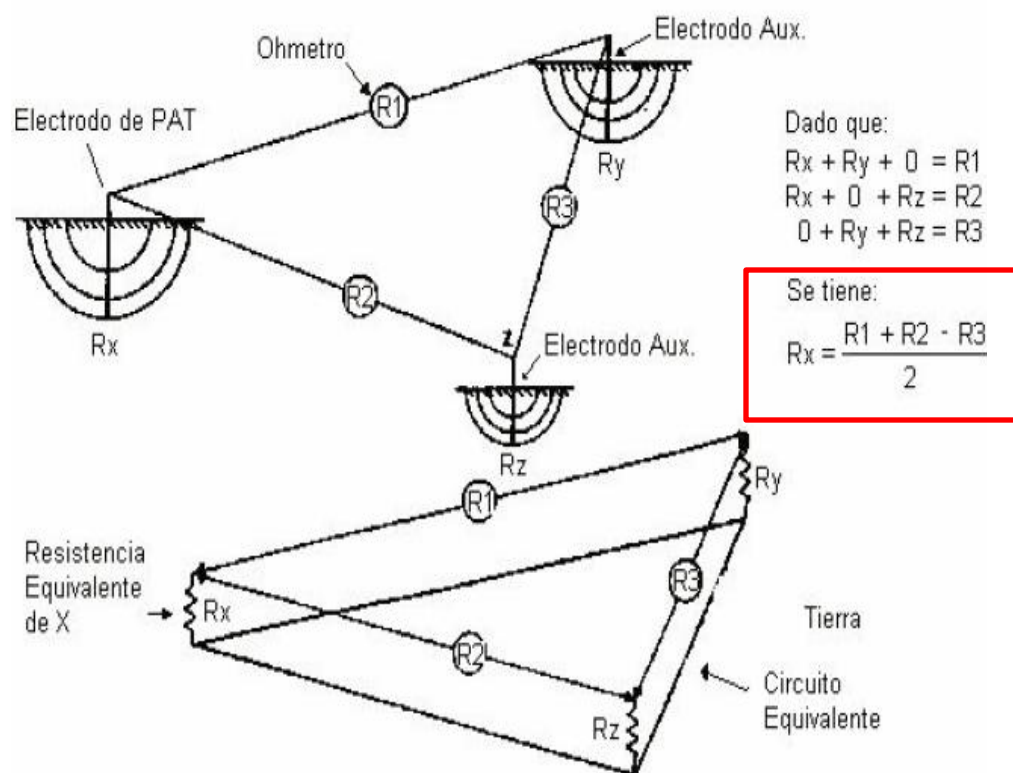
También se puede usar un voltímetro y amperímetro:



Teoría de la Medición de Resistencia de Puesta a Tierra

Hay otros métodos además del 62%

Método de los tres puntos:



- Se utilizan dos electrodos auxiliares con R_y y R_x .
- Los electrodos forman un triangulo y se miden resistencias entre ellos.
- Se obtienen mejores resultados cuando las resistencias son parecidas.
- Distancia recomendada 8 mts.
- Buen método cuando no se pueden poner los electrodos en línea recta.
- El método da resultado cuando el suelo es completamente homogéneo.

Valores de Resistencia

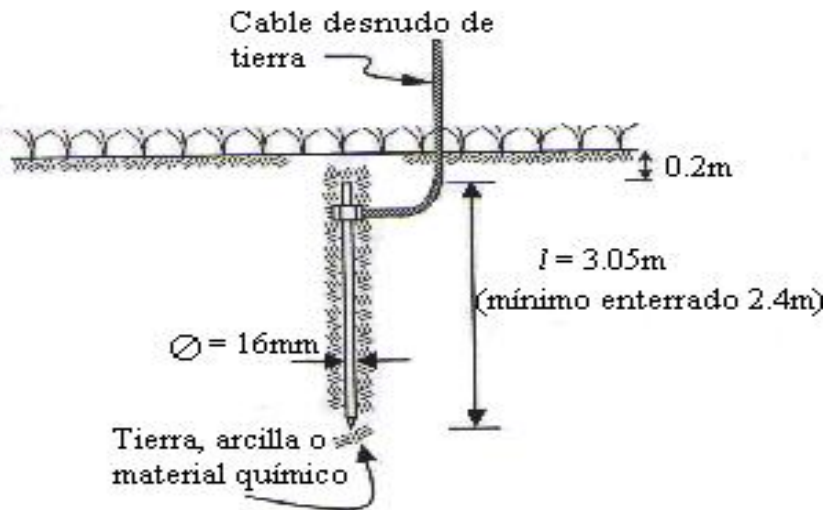
Los valores recomendados son los siguientes:

- Para grandes subestaciones, líneas de transmisión y estaciones de generación: menor a 1 Ohm.
- Para Subestaciones de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales: entre 1 y 5 Ohm.
- Para un electrodo simple: menor a 10 Ohm

TIPOS DE PUESTA A TIERRA

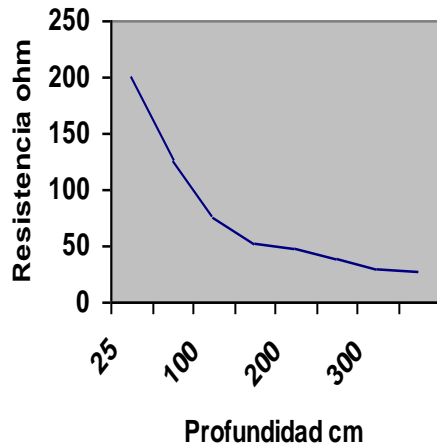
Porcentaje de disminución de R en función de la configuración de electrodos

Varilla Copperweld

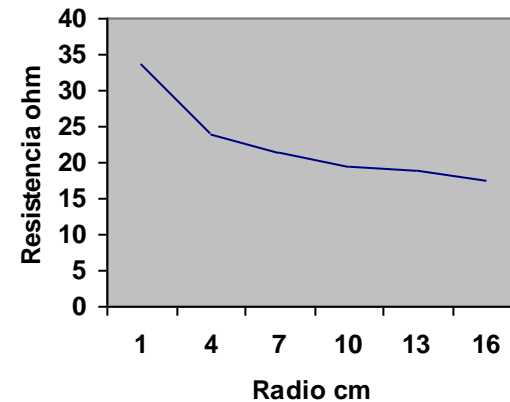


Numero de electrodos	Valor original	El valor original se reduce al
Un solo electrodo	100%	
Dos electrodos en línea		55%
Tres electrodos en línea		38%
Tres electrodos en triángulo		35%
Cuatro electrodos en simetría		28%
Ocho electrodos en simetría		16%

VARIACION DE LA RESISTENCIA EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD, DIAMETRO Y TEMPERATURA



— Línea



$$R = \rho / 2\pi L [\ln(4L/a) - 1]$$

$$R = \rho / 2\pi L [\ln(4L/a) - 1]$$

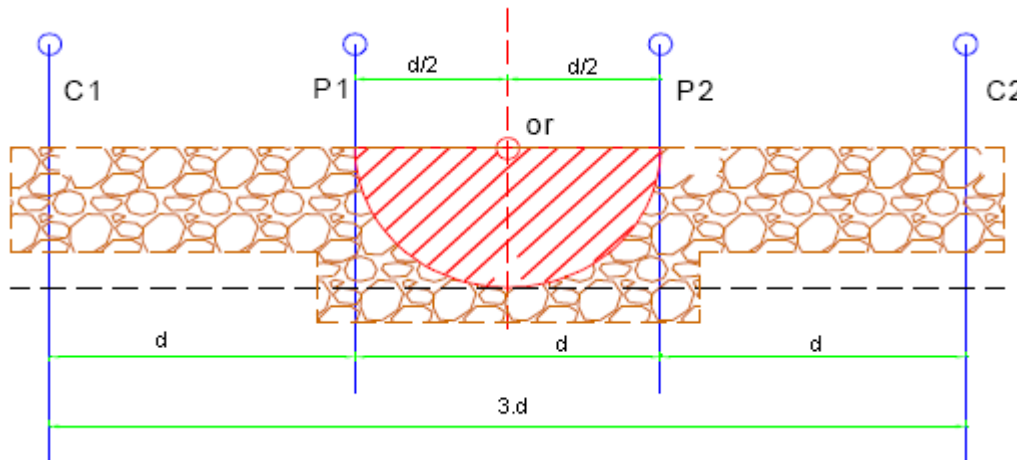
R = resistencia en Ω

ρ = resistividad del terreno $\Omega \cdot \text{cm}$

L = longitud del electrodo

a = radio del electrodo en cm

Medición de la Resistividad. Método de Wenner



Haciendo que:

$$X_1 = d \quad \left| \quad X'_1 = D - X_1 = 2.d\right.$$

$$X_2 = 2.d \quad \left| \quad X'_2 = D - X_2 = d\right.$$

$$D = 3.d$$

Se tiene .

$$U_{12} = \frac{\rho.I}{2.\pi} \cdot \left[\frac{1}{d} - \frac{1}{2.d} - \frac{1}{2.d} + \frac{1}{d} \right]$$

$$U_{12} = \frac{\rho.I}{2.\pi} \cdot \left[\frac{1}{d} \right]$$

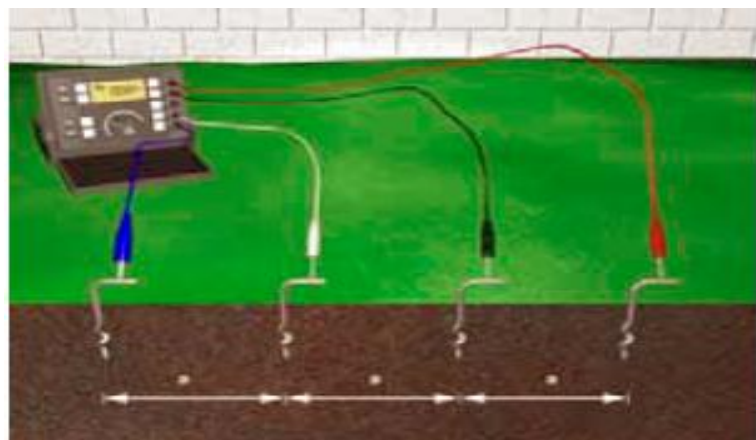
La resistividad
Será:

$$\rho = 2.\pi.d \cdot \left[\frac{U_{12}}{I} \right] = 2.\pi.d.R_m$$

Donde R_m es la resistencia medida

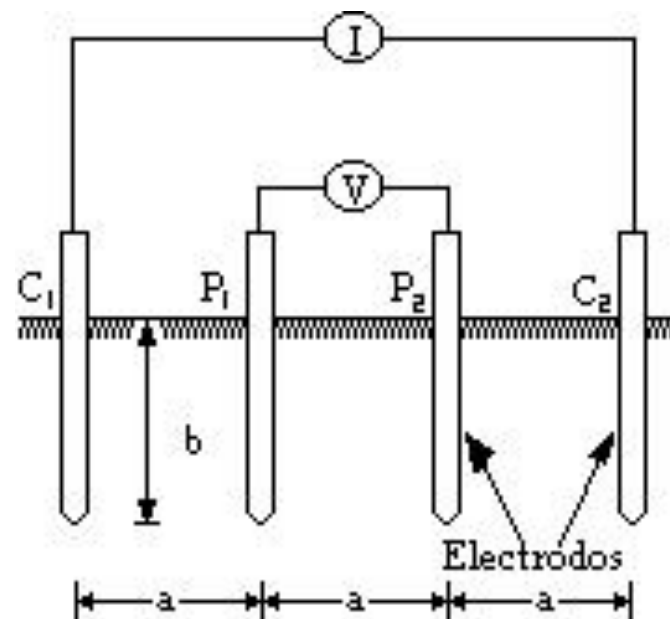
Medición de la Resistividad. Método de Wenner

Metodo de Wenner



(a)

- 1) Los electrodos se colocan en linea recta
- 2) Las distancias seran iguales a **a**
- 3) La profundidad sera **b** y esta será mucho menor que **1/10** de **a**
- 4) Se inyecta corriente por **C** y se mide tensión por **P**.
- 5) Luego se calcula **R** y por lo tanto la **Resistividad**



ρ = Resistividad promedio a la profundidad b (Ohms * mts)

a = Distancia entre electrodos (cm)

R = Resistencia medida por el instrumento (Ohms)

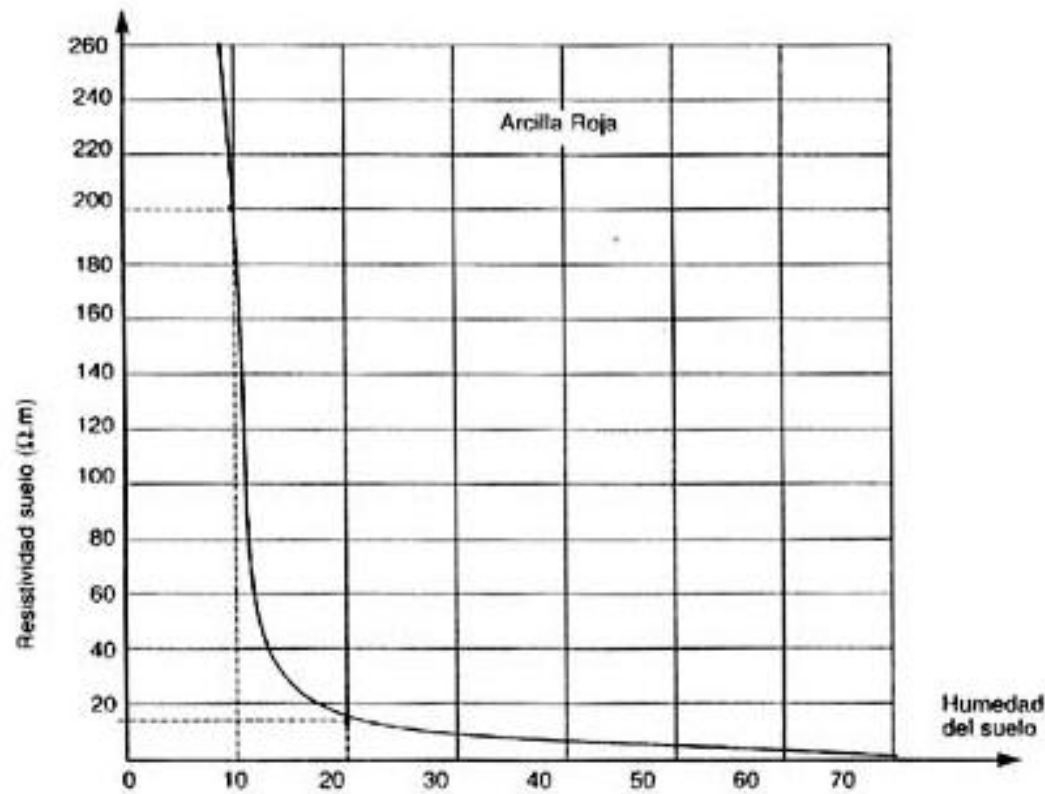
$$\rho = 2\pi a R$$

Algunos valores de Resistividad

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN Ohm x m
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad en Ohm x m
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables..	3.000

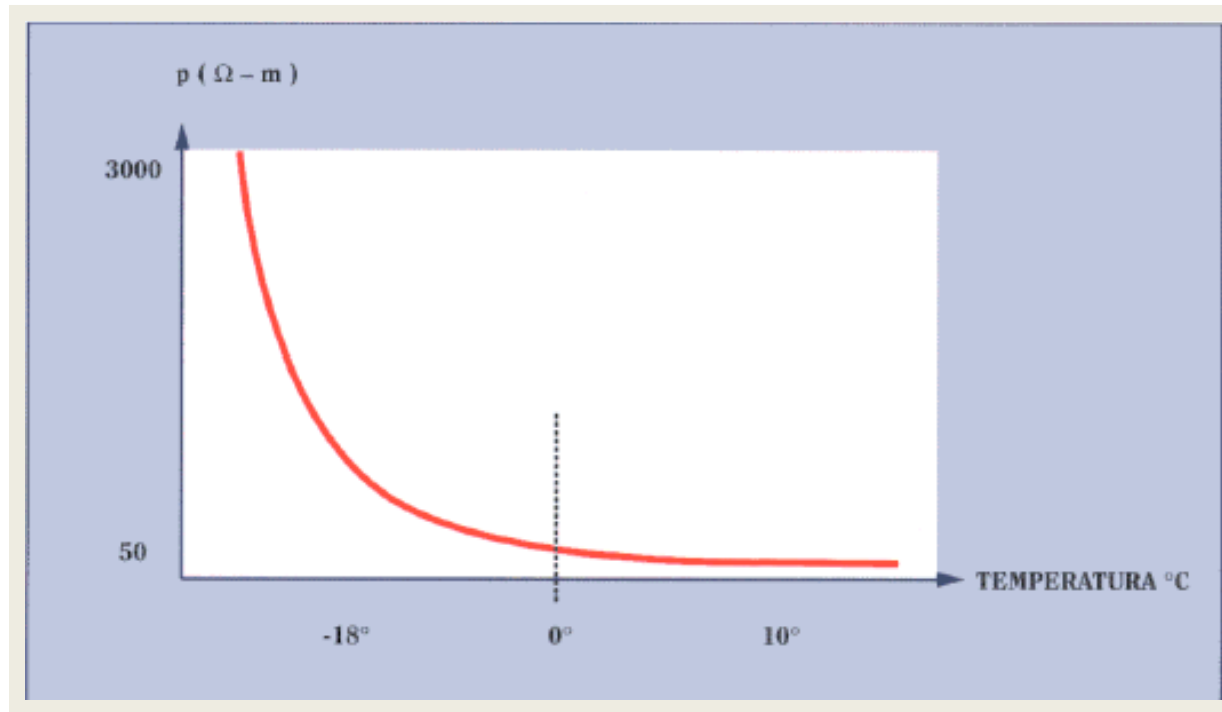
Resistividad vs. humedad



Humedad del suelo

Debe buscarse lograr una humedad de tipo permanente y de valores 30 a 35%. Valores superiores inciden muy poco, pero por debajo de 20% se incrementa mucho la resistencia de tierra.

Resistividad vs. temperatura

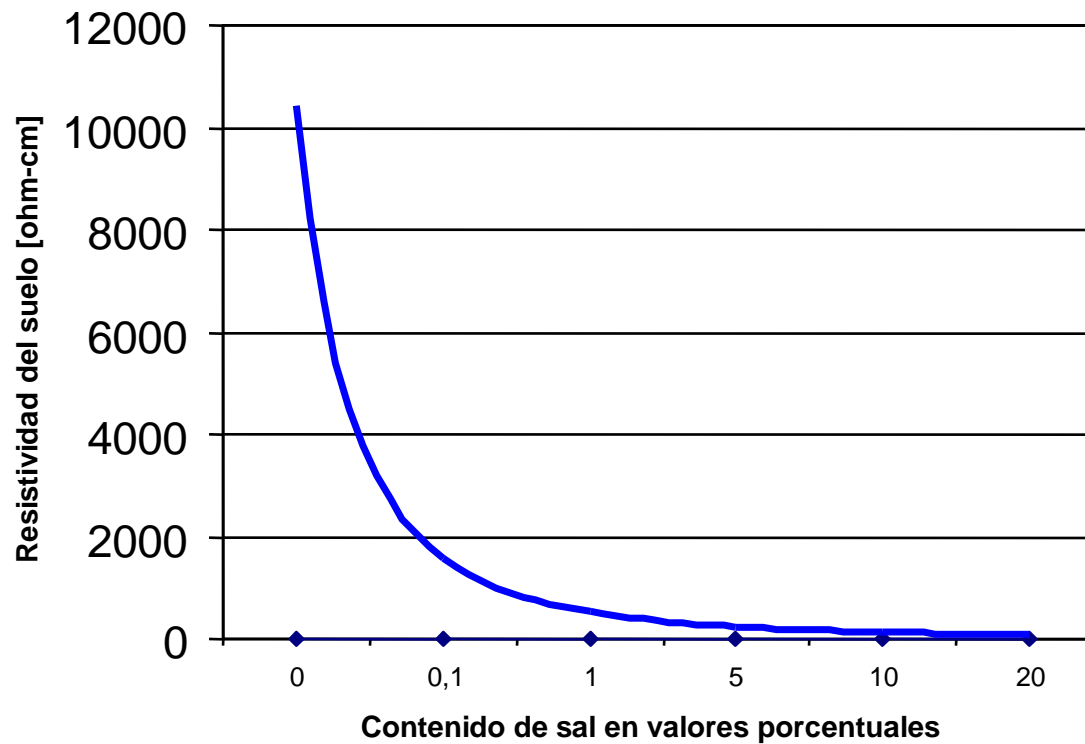


Temperatura del suelo

La incidencia de la temperatura es mínima a valores superiores a 0 $^{\circ}C$, por debajo de 2 a 3 $^{\circ}C$ bajo cero crece mucho la resistividad a 50 y 100 Ωm).

Resistividad- salinidad

Variación de la Resistividad con la salinidad del terreno



Otros equipos de Medición de Resistencia y Resistividad

