



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



# Instalaciones Eléctricas

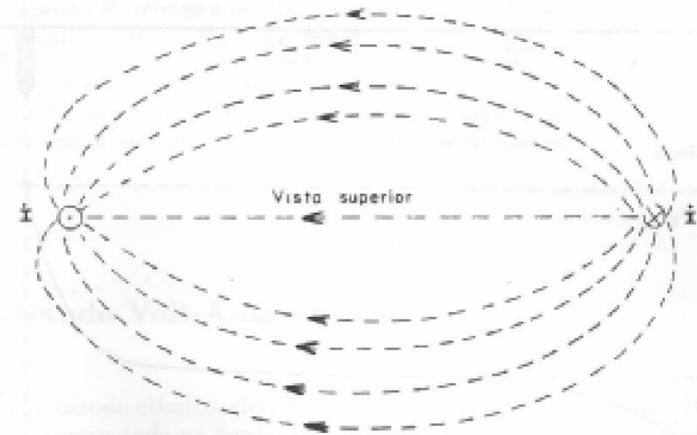
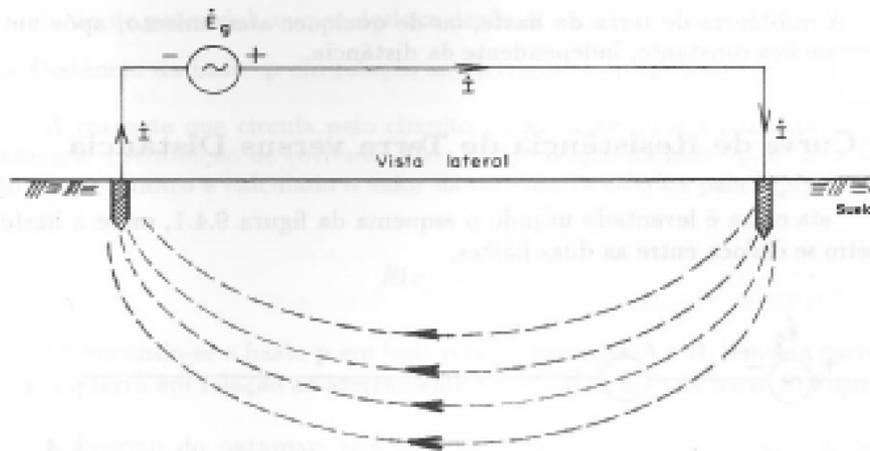
Puesta a Tierra y Conductores de Protección

Presentación 2

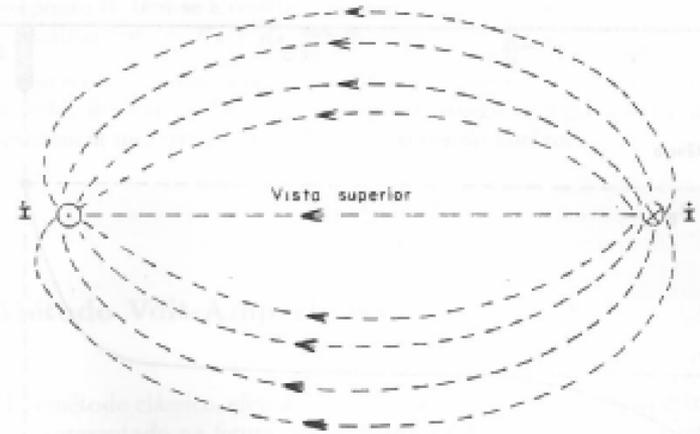
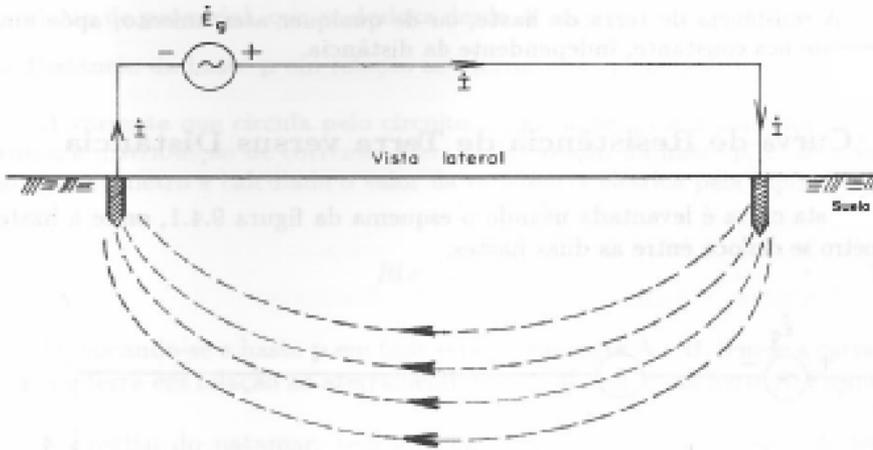
## Medida de la resistencia de una PaT

Esta medida se realiza por el método volt-amperimétrico, haciendo circular una corriente entre la PaT cuya resistencia se desea medir y una pica de referencia, y midiendo la tensión entre el borne principal de tierra y una segunda pica de referencia ubicada fuera de la zona de influencia de la PaT.

Si se inyecta corriente entre dos picas:



## Medida de la resistencia de una PaT



Puede calcularse la resistencia como:

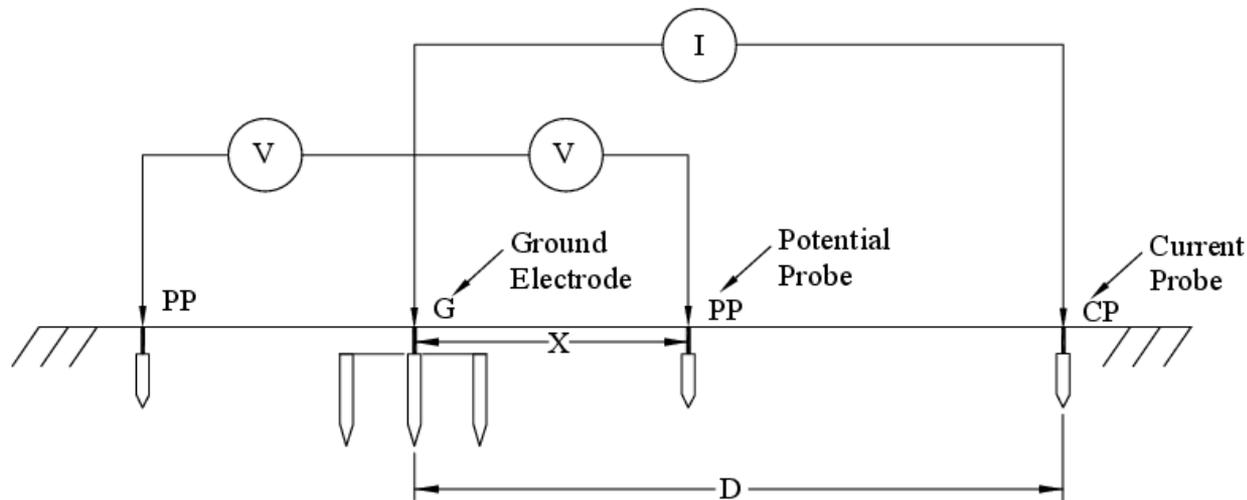
$$R_T = \rho \sum_i \frac{\Delta x_i}{S_i}$$

Donde se consideran superficies equipotenciales de área  $S_i$  separadas  $\Delta x_i$

Al alejarse de la primera pica, el área  $S_i$  aumenta y la resistencia se vuelve constante.

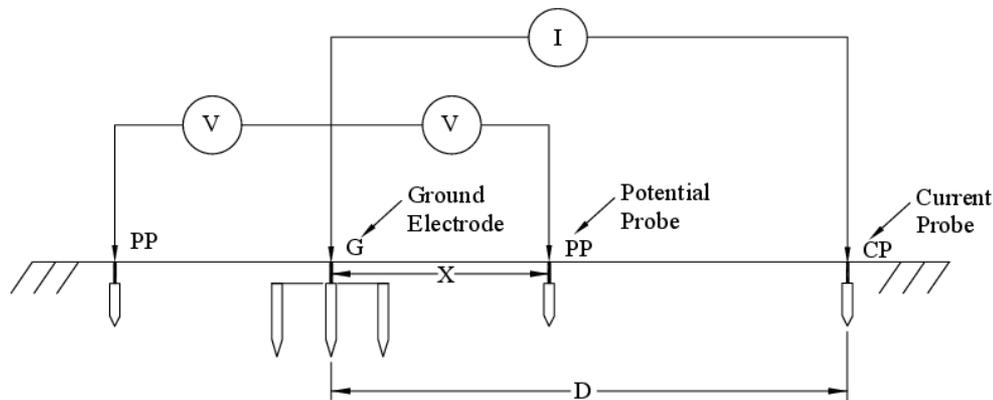
## Medida de la resistencia de una PaT

Para realizar la medida se inyecta corriente entre la PaT a medir (G) y una pica auxiliar de corriente (CP) y se desplaza una pica que mide tensión (PP). PP puede ubicarse en la misma dirección de CP o en la dirección contraria, como se muestra en la figura:



Para asegurar la exactitud de la medida se debe ubicar la pica auxiliar de corriente a una distancia grande en comparación a las dimensiones de la PaT a medir (mayor a 5 veces la dimensión mayor de G).

## Medida de la resistencia de una PaT

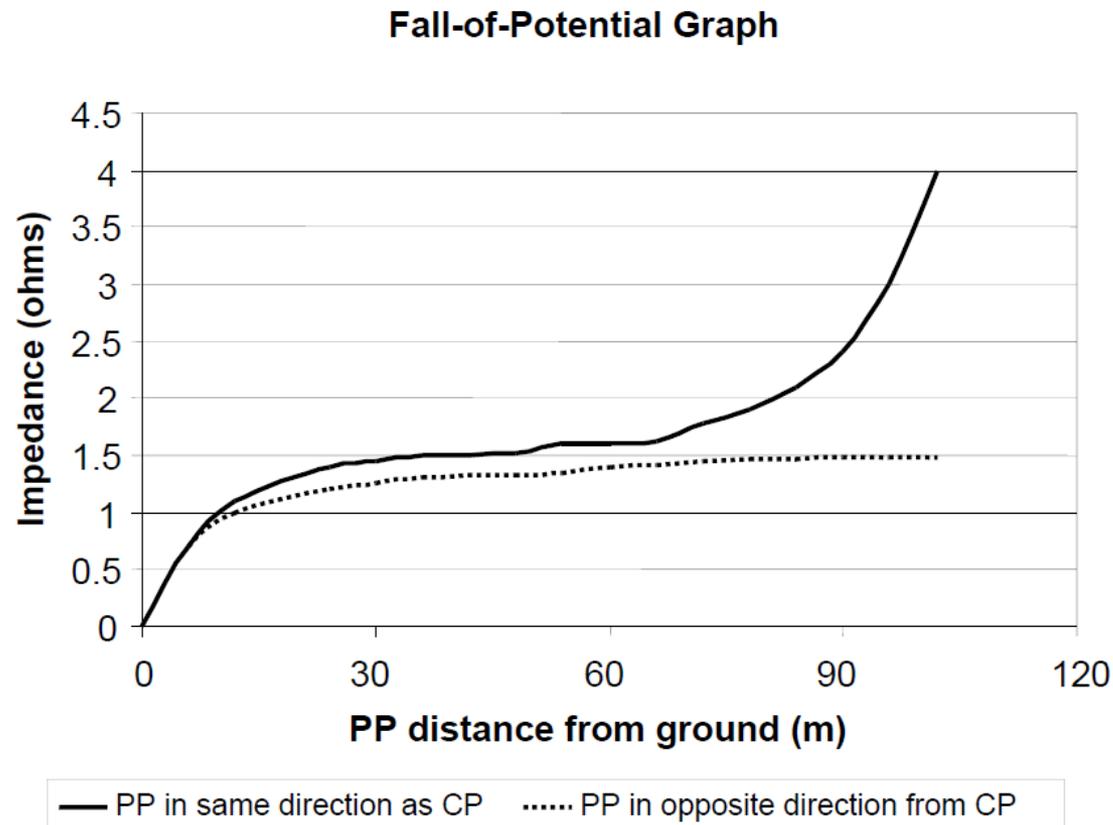


En teoría, con un suelo de resistividad uniforme, G, PP y CP en una misma línea, a la distancia  $X=0,62.D$  se obtiene la resistencia de PaT de G.

En los hechos debe verificarse que PP no sufre influencia por G ni CP, se realizan varias medidas hasta comprobar que se tiene una estabilidad en las mismas.

# Medida de la resistencia de una PaT

Gráfico típico de medida de la resistencia por este método:



# Medida de la resistividad del suelo

Factores que influyen en el valor de la resistividad del suelo:

- Tipo de suelo
- Estratificación del suelo - suelos constituidos por capas de distintos materiales y de distintos espesores.
- Humedad
- Temperatura
- Composición y concentración de las sales disueltas en agua

## Medida de la resistividad del suelo

- Resistividades de distintos tipos de suelo:

Naturaleza del suelo	Resistividad ( $\Omega\text{m}$ ) <sup>[1]</sup>
Suelos pantanosos, humus, lodo	5 a 100
Tierra de jardín húmedo (50% de humedad)	140
Tierra de jardín poco húmedo (20% de humedad)	480
Arcilla seca	1.500 a 5.000
Arcilla con 40% de humedad	80
Arcilla con 20% de humedad	330
Arena mojada	1.300
Arena seca	3.000 a 8.000
Calcáreo compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

[1] Son considerados “buenos conductores” los suelos con resistividad entre 50 y 100  $\Omega\text{m}$ .

## Medida de la resistividad del suelo

- Dependencia de la humedad:

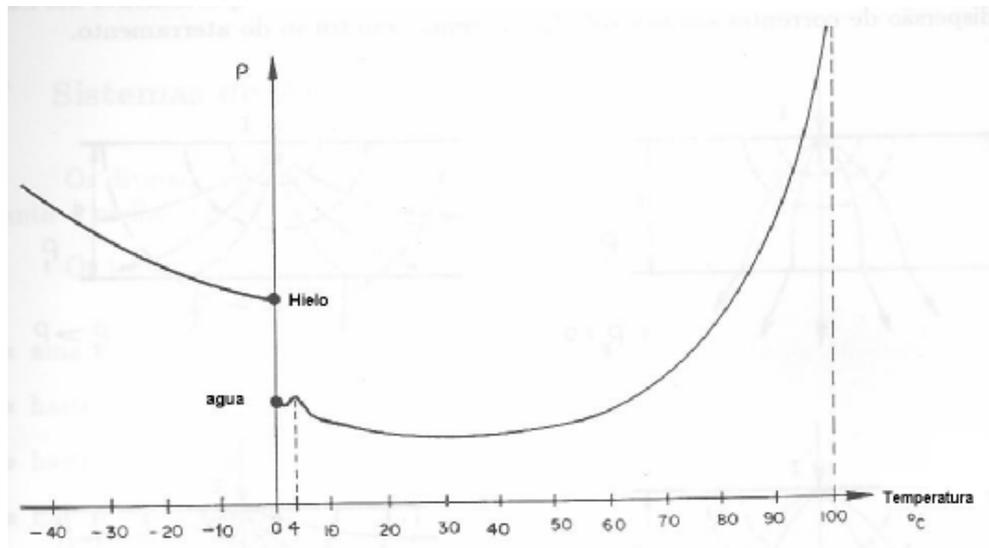
La variación de la resistividad del suelo con la humedad se debe a que la conducción de cargas eléctricas en el suelo es predominantemente iónica. Un porcentaje mayor de humedad hace que las sales presentes en el suelo se disuelvan, formando un medio favorable al pasaje de la corriente iónica.

INDICE DE HUMEDAD (% por peso)	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ .m) suelo arenoso
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

## Medida de la resistividad del suelo

- Dependencia de la temperatura:

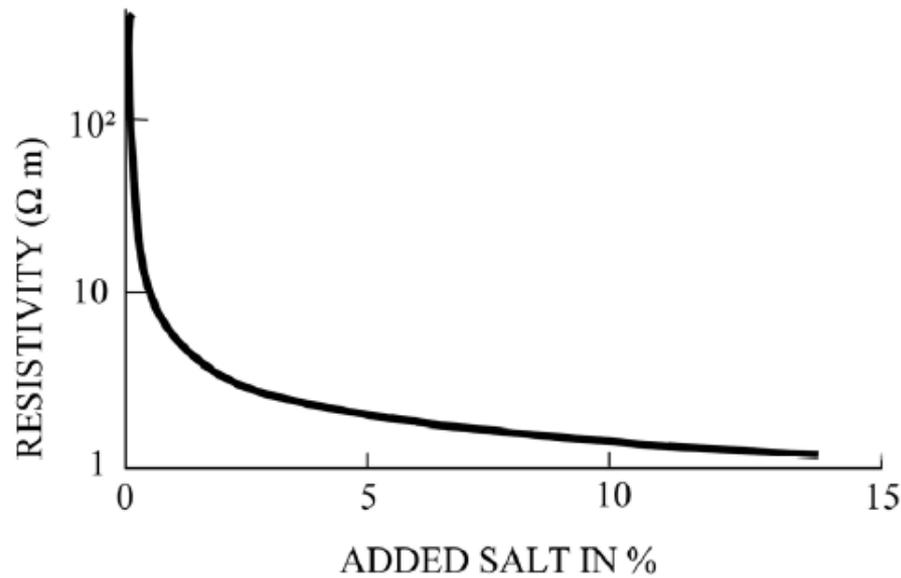
La resistividad se incrementa notoriamente para temperaturas de congelación:



## Medida de la resistividad del suelo

- Concentración de sales disueltas:

Debido al tipo de conducción de corriente por el suelo (iónica), ésta se incrementa al disponer mayor cantidad de sales disueltas:



## Medida de la resistividad del suelo

- Suelo no homogéneo - modelo en dos capas:

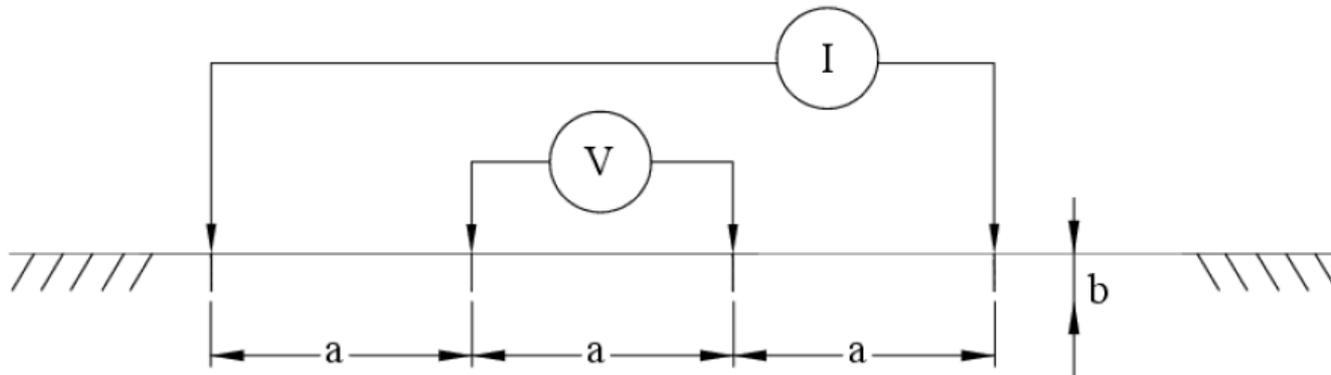
Los suelos en su mayoría **no son homogéneos**, sino formados por varias capas de resistividad y profundidad diferentes, estas capas en general son paralelas a la superficie del suelo, en algunos casos aparecen inclinadas y hasta verticales, debido a fallas geológicas.

Objetivo: relevar **resistividad en función de la profundidad  $\rho(a)$** , y a partir de dicha curva modelarlo como un suelo de varias capas horizontales, homogéneas de resistividad  $\rho_j$  y profundidad  $p_j$ .

Se modelará en capas horizontales, siendo el caso más común y para el que se ha desarrollado teoría.

# Medida de la resistividad del suelo

Método de medida de resistividad de Wenner:



Se clavan dos picas de corriente y dos de tensión, equiespaciadas, respetando  $b < 0,1 \cdot a$

Realizando el cociente entre la tensión y corriente medidas, se obtiene la expresión de la resistividad del suelo:

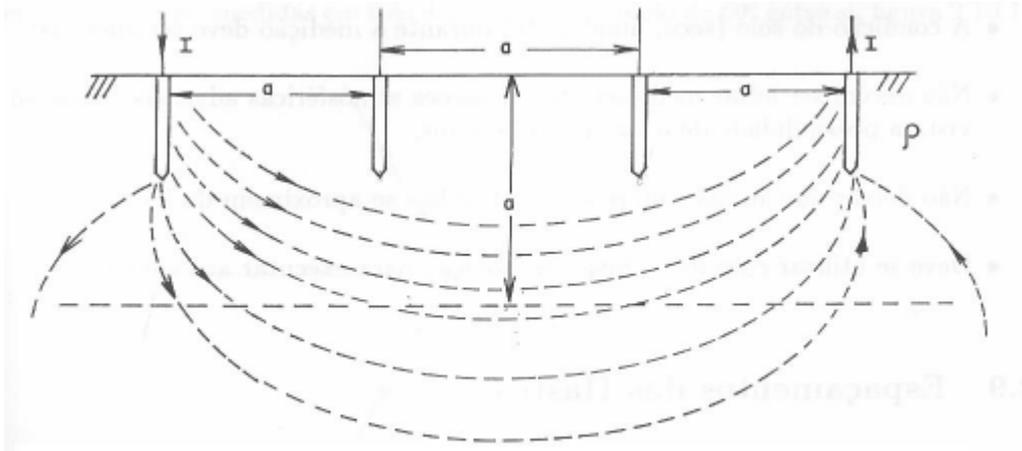
$$\rho = \frac{4\pi R \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2b)^2}}}$$

## Medida de la resistividad del suelo

Despreciando la profundidad de enterramiento de las picas en relación al espaciamiento:

$$\rho = 2\pi aR$$

No obstante, la situación real es que el suelo no es homogéneo y su **resistividad varía con la profundidad**. El método de Wenner considera que el 58% de la distribución de corriente que circula entre las picas de corriente lo hace a una profundidad igual al espaciamiento entre dichas picas ( $a$ ), como se muestra en la figura siguiente:



Se está midiendo entonces la resistividad a una profundidad  $a$ :

$$\rho(a) = 2\pi a \times R_M$$

Siendo  $R_M$  la resistencia que mide el equipo ( $V/I$ ).

## Medida de la resistividad del suelo

Entonces haciendo variar la distancia entre picas se puede relevar la curva  $\rho(a)$  realizando diferentes medidas de la resistencia.

Se debe asegurar que se clavan las cuatro picas de forma alineada y a la misma profundidad.

- Distancias recomendadas: 1, 2, 4, 6, 8, 16, 32 m.
- Dirección: deben realizarse medidas en tres direcciones (cada 60°)
- Puntos de medición:
  - En caso de sistemas de puesta a tierra pequeños: ej. PaT de transformadores alcanza con un punto.
  - En caso de subestaciones, se recomienda medir en varios puntos, cubriendo el área de la malla.

# Medida de la resistividad del suelo

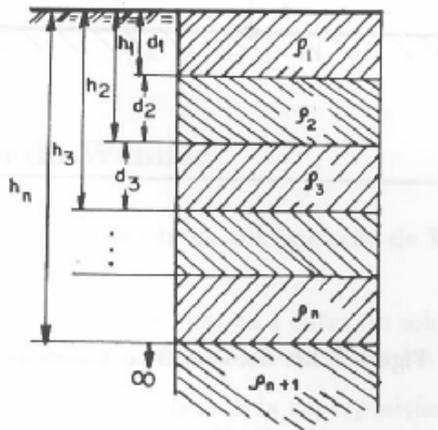
Análisis de las medidas:

Una vez realizadas todas las mediciones debe seguirse los siguientes pasos:

1. Calcular la media aritmética de los valores de resistividad, medidas para cada separación entre picas.
2. Calcular el desvío de cada valor respecto a su media.
3. Desestimar los valores que tienen un desvío mayor al 50%. Si hubieran muchas medidas en desvío mayores a 5% , se recomienda repetir las medidas.
4. Recalcular la media y trazar la curva  $\rho(a)$ .

# Medida de la resistividad del suelo

A partir de la curva  $\rho(a)$  se puede obtener un modelado del suelo en varias capas, cada una de ella con diferente resistividad y profundidad:



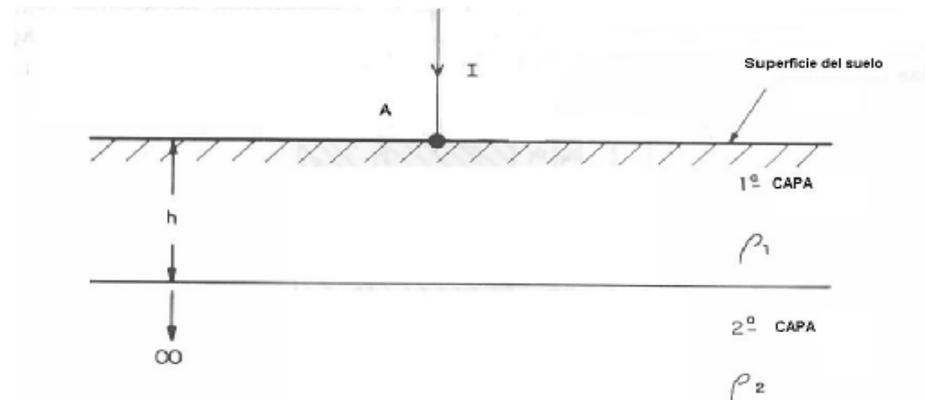
Este modelado se puede realizar mediante software especializado.

Se puede reducir el modelo de n capas a un suelo de dos capas:

$$d_1 = d_{eq} = \sum_1^n d_i \qquad \rho_1 = \rho_{eq} = \frac{d_{eq}}{\sum_1^n \frac{d_i}{\rho_i}}$$

$$d_2 = \infty$$

$$\rho_2 = \rho_{n+1}$$



## Medida de la resistividad del suelo

Las resistencias indicadas por las distintas fórmulas analíticas correspondientes a las distintas configuraciones de jabalinas y electrodos, analizadas anteriormente, corresponden a **suelo homogéneo**.

Si el suelo tiene varias capas de diferente resistividad, puede aplicarse una **resistividad aparente del suelo en relación al sistema de PaT** y aplicar las mismas fórmulas.

La resistividad aparente  $\rho_a$  es la resistividad del suelo homogéneo equivalente  $\rho_h$ , que da para una misma configuración de puesta a tierra  $f(g)$ , el mismo valor de resistencia de puesta a tierra  $R_T$ .

$$\begin{aligned} R_T &= \rho_a \times f(g) \\ R_T &= \rho_h \times f(g) \end{aligned} \quad \rightarrow \rho_h = \rho_a$$

Un mismo suelo, distintas configuraciones de PaT: distintos valores de  $\rho_a$ , ya que depende de la profundidad de penetración de las corrientes en el suelo y por tanto de las capas del modelo involucradas en la conducción.

## Medida de la resistividad del suelo

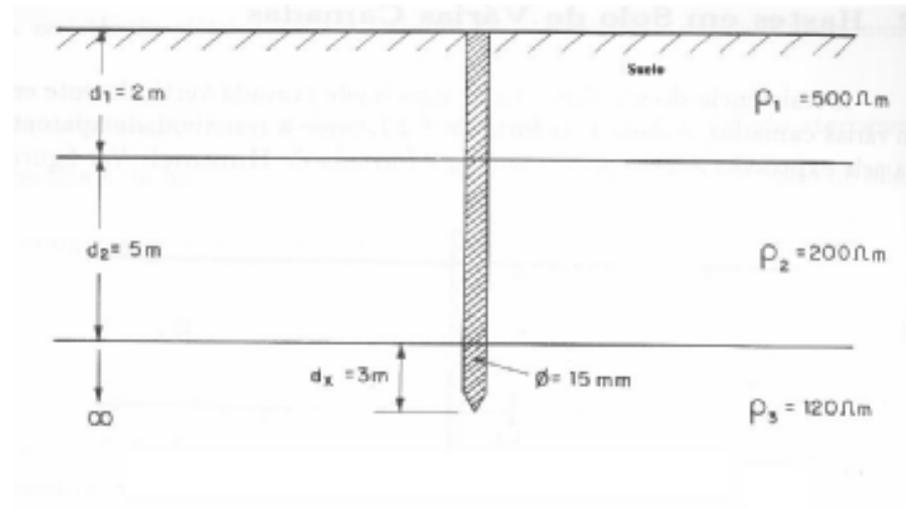
- Para una **jabalina vertical** la resistividad aparente resulta:

Para tres capas:

$$\rho_a = \frac{d_1 + d_2 + d_x}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_x}{\rho_3}}$$

Para dos capas:

$$\rho_a = \frac{d_1 + d_x}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_x}{\rho_2}}$$



## Medida de la resistividad del suelo

- Para otras configuraciones se definen los coeficientes de penetración ( $\alpha$ ) y divergencia ( $\beta$ ) para modelar la resistividad aparente:

**Coeficiente de penetración ( $\alpha$ ):**  $\alpha = \frac{r}{d_1}$

Indica el grado de penetración de las corrientes por el aterramiento en el suelo.

Para  $n$  jabalinas alineadas, separadas a una distancia  $e$ :  $r = \frac{(n-1) \times e}{2}$

Paras otras configuraciones:  $r = \frac{A}{D}$ , donde  $A$  es el área de la PaT y  $D$  es la mayor dimensión de la PaT.

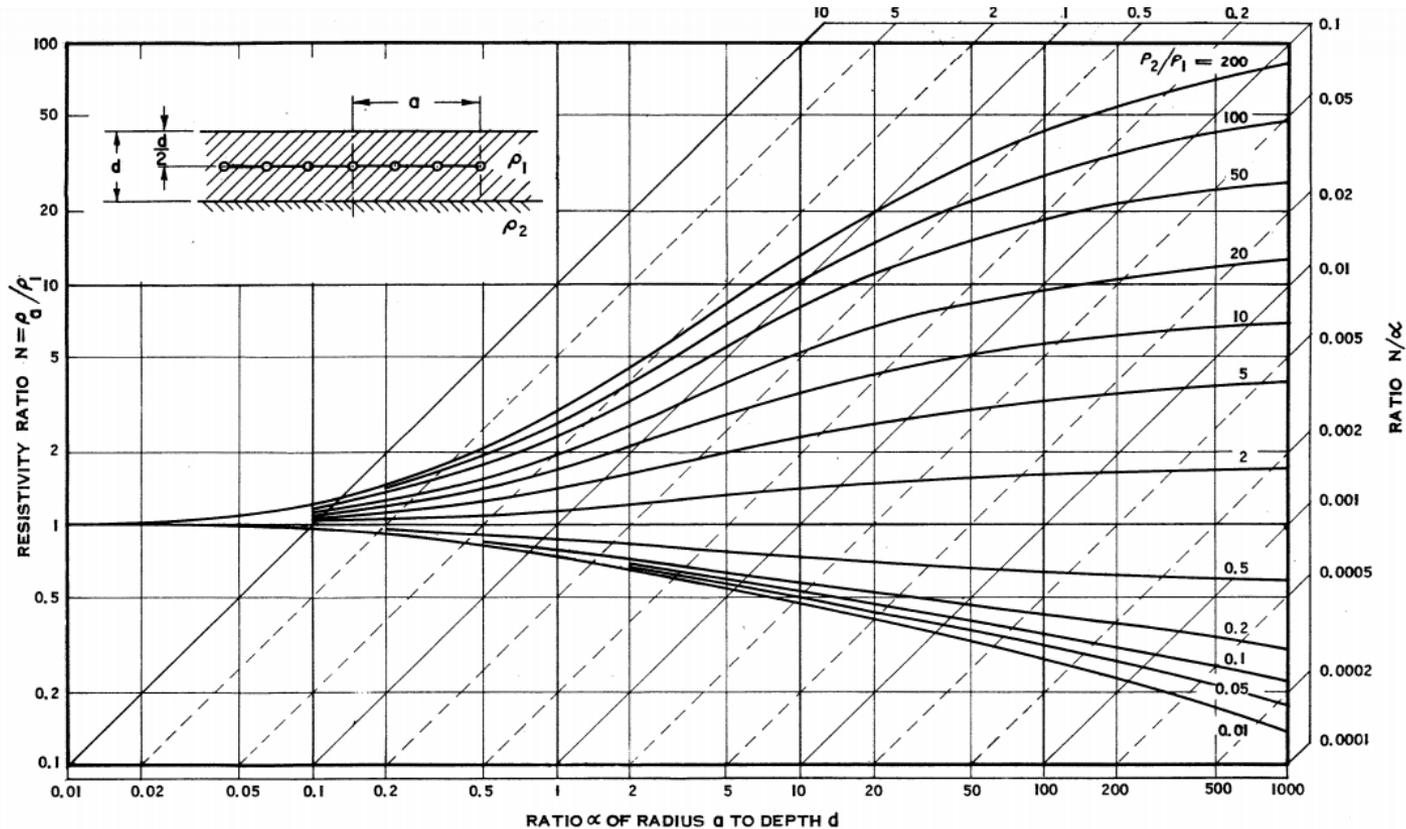
**Coeficiente de divergencia ( $\beta$ ):**  $\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1}$

Es la relación de las resistividades de la capa superior e inferior.

# Medida de la resistividad del suelo

Mediante los coeficientes de penetración ( $\alpha$ ) y divergencia ( $\beta$ ) y las curvas de Endrenyi se obtiene la relación entre la resistividad aparente y de la primera capa:

$$\rho_a = N(\alpha, \beta) \times \rho_1$$



# Características constructivas de las PaT

- **Electrodos de tierra**

Los electrodos de tierra deben soportar la **corrosión** y tener adecuada **resistencia mecánica**.

Tipos de electrodos de tierra:

- Cintas (pletinas) o conductor desnudo multifilar
- Caños o barras (picas o jabalinas)
- Placas

Materiales:

- Cobre
- Aero galvanizado en caliente
- Acero inoxidable
- Acero con recubrimiento de cobre

## Características constructivas de las PaT

- Electrodo de tierra

Dimensiones mínimas para los electrodos de tierra (Reglamento UTE):

Electrodo	Diámetro/Sección	Largo	Superficie	Espesor
Placa de cobre			0.5 m <sup>2</sup>	2mm
Barra de cobre	14mm	2m		
Conductor desnudo multifilar	35 mm <sup>2</sup>			
Cinta o pletina de cobre	35 mm <sup>2</sup>			2mm
Cable de acero galvanizado	95 mm <sup>2</sup> - cada alambre 2.5 mm <sup>2</sup>			

Las canalizaciones metálicas de otros servicios (agua, gas, calefacción central, etc.) no deben ser utilizadas como electrodos de tierra, pero si debe realizarse su conexión equipotencial a la barra principal de tierra.

## Características constructivas de las PaT

- **Conductor de tierra:**

El Reglamento de Baja Tensión de UTE le llama Conductor de enlace con tierra y establece como sección mínima para el mismo 35 mm<sup>2</sup> en cobre, a menos que la línea repartidora sea de menor sección, en cuyo caso será de la misma sección que los conductores de fase.

- **Borne principal de tierra**

En toda instalación debe preverse un borne o barra principal de tierra, para la conexión de los siguientes conductores:

- Conductores de tierra.
- Conductores de protección que no estén conectados a este terminal a través de otros conductores de protección.
- Conductores de conexión equipotencial principal.

Solo se podrá remover conductores de este borne mediante herramientas.

## Características constructivas de las PaT

- **Conductores de Protección (PE)**

Provee la conexión a tierra de todas las masas de la instalación. Los mismos conducen las corrientes de falla de aislación, entre un conductor de fase y una masa, a través del neutro de la fuente.

El conductor PE es conectado a otro conductor PE o al borne principal de tierra de la instalación, y este a los electrodos de tierra a través del conductor de tierra.

Los conductores de protección deben ser aislados e identificados con los colores verde/amarillo y deben estar protegidos contra daños mecánicos y químicos.



## Características constructivas de las PaT

- **Conductores de Protección (PE)**

Como conductores de protección pueden utilizarse:

- Conductores aislados formando parte de cables multipolares.
- Conductores aislados agrupados con otros cables.
- Conductores aislados separados.

No se permite usar como conductores de protección, elementos conductores extraños, como por ejemplo:

- Cañerías de agua.
- Cañerías que contengan gases o líquidos inflamables.
- Soportes de canalizaciones

El conductor PE **no debe incluir ningún medio de desconexión**, asegurando la continuidad del circuito de protección.

# Características constructivas de las PaT

- Conductores de Protección (PE)

Secciones mínimas:

Relación entre las secciones de los conductores de protección y los conductores de fase:

Sección de los conductores de fase de la instalación $S$ (mm <sup>2</sup> )	Sección mínima de los conductores de protección $S_{PE}$ (mm <sup>2</sup> )
	Si el conductor de protección es del mismo material que el conductor de fase
$S \leq 16$	$S$
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$S/2$

## Características constructivas de las PaT

- **Conductores de Protección (PE)**

Secciones mínimas:

Además de lo anterior, debe verificarse que el conductor resista el efecto térmico de una descarga:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k}$$

Dónde:

- $S$  es la sección del conductor en mm<sup>2</sup>.
- $I$  valor RMS, en A, de la corriente de defecto a tierra, que puede circular por el conductor de protección.
- $t$  es el tiempo de funcionamiento del dispositivo de corte, en segundos.
- $k$  es un factor que depende del tipo de material del conductor PE, del tipo de aislamiento y de las temperaturas inicial y final.

## Características constructivas de las PaT

- Conductores de Protección (PE)

Secciones mínimas:

El valor de  $k$  depende del material, y del hecho que el conductor PE se encuentre o no en contacto con otros cables cargados:

Aislamiento del conductor	Temperatura (°C)		Material del conductor
	Inicial	Final	Cobre
			Valores de $k$
PVC 70 °C ( $S \leq 300 \text{ mm}^2$ )	30	160	143
PVC 70 °C ( $S > 300 \text{ mm}^2$ )	30	140	133
EPR o XLPE 90 °C	30	250	176

PE no forma parte de un cable multipolar o no está agrupado con otros cables.

Aislamiento del conductor	Temperatura (°C)		Material del conductor
	Inicial	Final	Cobre
			Valores de $k$
PVC 70 °C ( $S \leq 300 \text{ mm}^2$ )	70	160	115
PVC 70 °C ( $S > 300 \text{ mm}^2$ )	70	140	103
EPR o XLPE 90 °C	90	250	143

PE forma parte de un cable multipolar o está agrupado con otros cables.

# Características constructivas de las PaT

- **Conductores de Protección (PE)**

Secciones mínimas:

En cualquier caso, deben tenerse en cuenta las secciones mínimas establecidas en el Reglamento de Baja Tensión:

- Para conductores de protección con protección mecánica: 2 mm<sup>2</sup>.
- Para conductores sin protección mecánica: 4 mm<sup>2</sup>.