

PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN

Parte 5 – Modelado del terreno

FERNANDO BERRUTTI

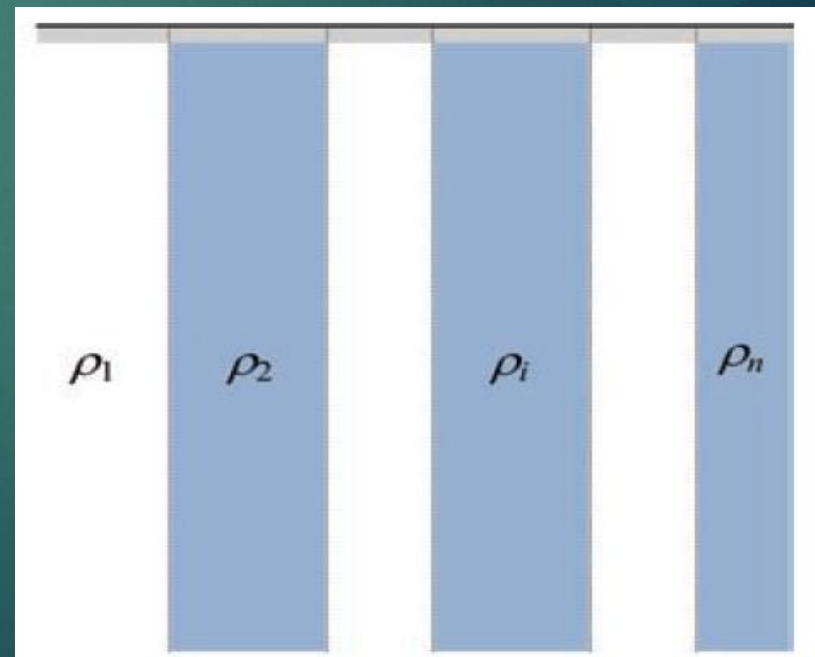
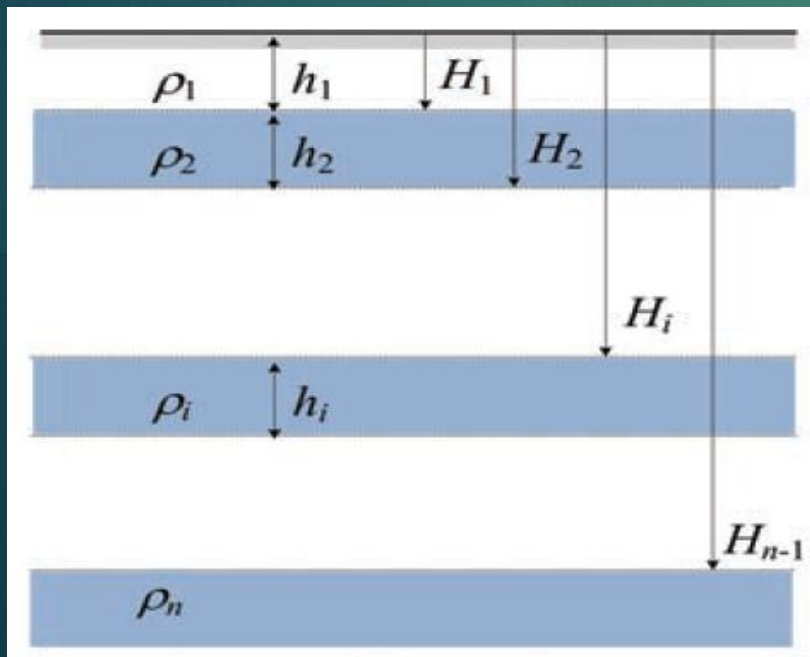
AÑO 2015

Importancia de la medida de resistividad del suelo

- ▶ El modelo de resistividad de suelo es la base del diseño de cualquier sistema de tierras, y conlleva una importante incertidumbre.
- ▶ La resistividad varía con la profundidad (estratificación horizontal), y ocasionalmente hay variaciones laterales (estratificación vertical).
- ▶ Afectación por condiciones estacionales: temperatura, humedad, salinidad.

Importancia de la medida de resistividad del suelo

- ▶ A partir de las medidas y determinación de modelo estratificado se obtiene un modelo de resistividad homogénea.

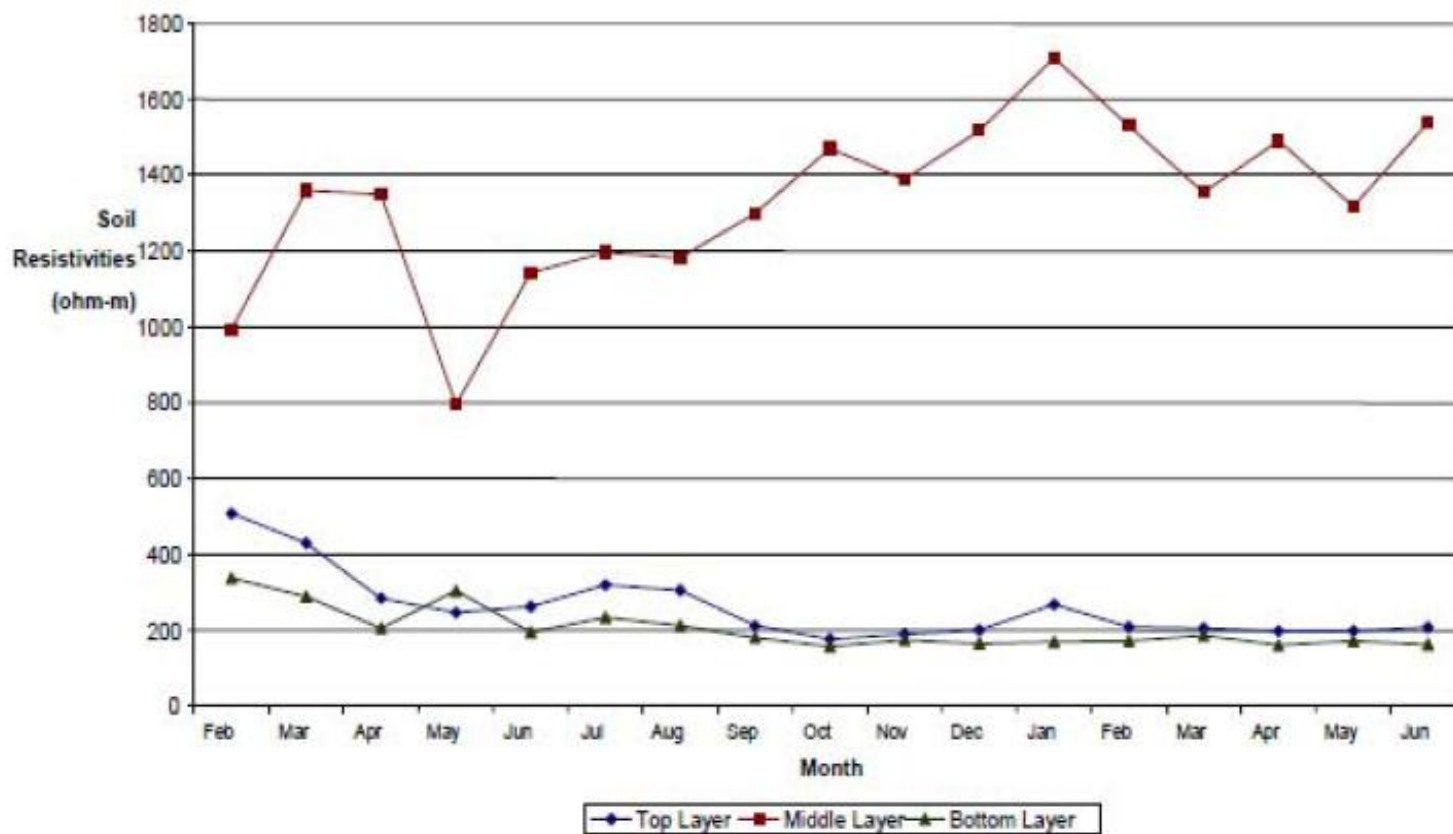


Variación de resistividad en el tiempo

4

Ejemplo de resistividad en suelo de tres capas medida en un lapso de 18 meses.

SUBESTACIONES EN MT

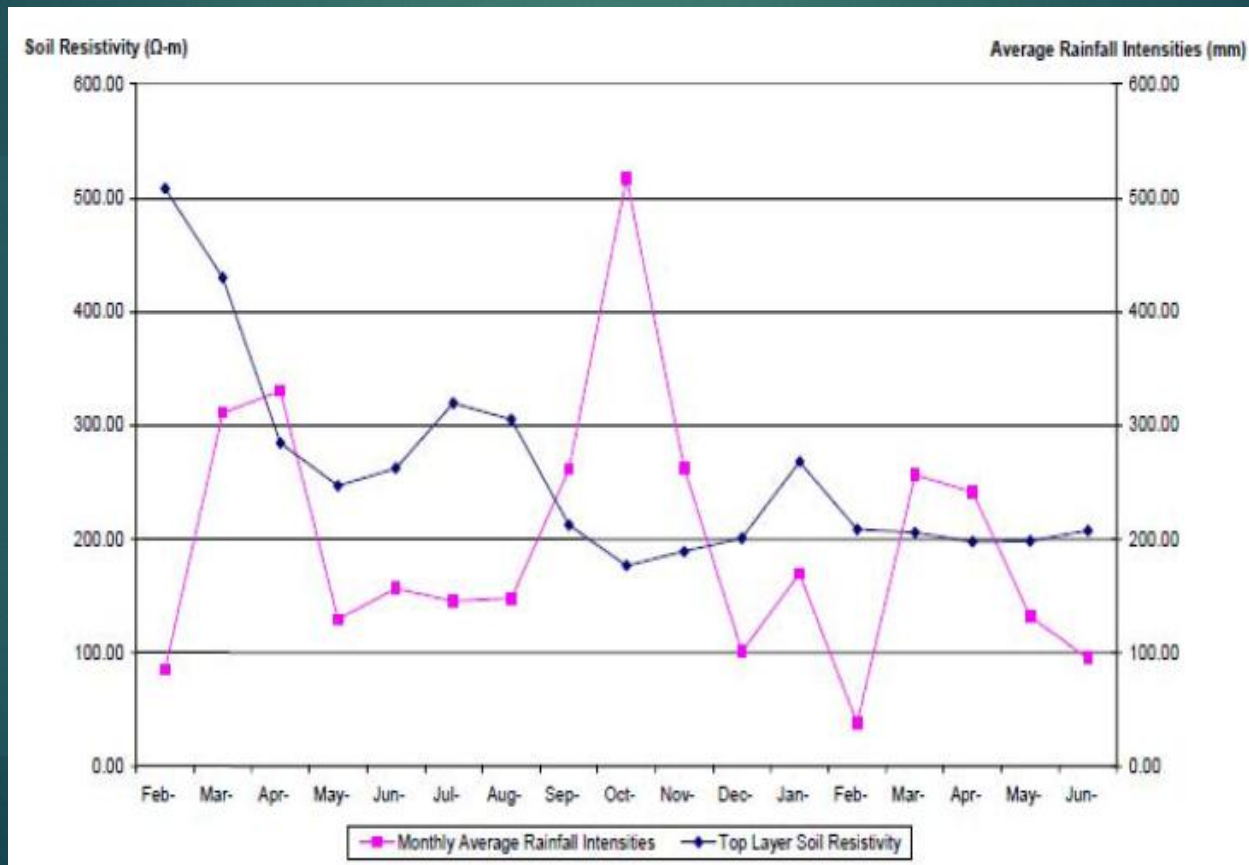


Variación de resistividad con las precipitaciones

5

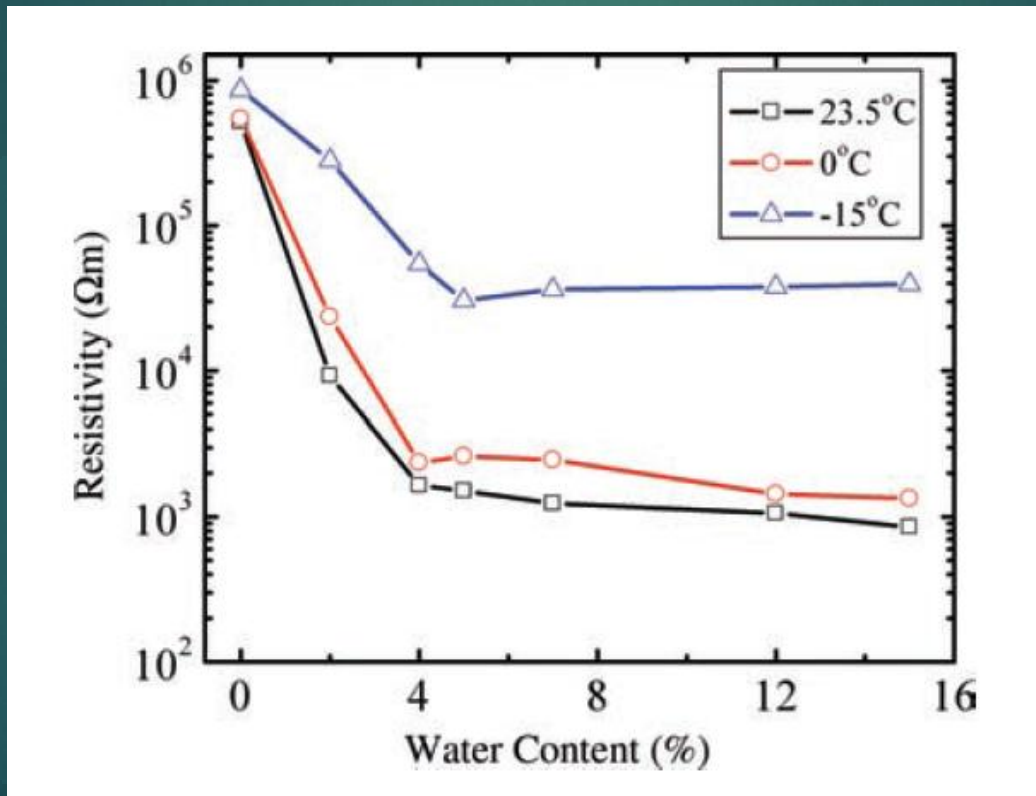
Efecto sobre la capa superior de precipitaciones en un lapso de 18 meses.

SUBESTACIONES EN MT



Variación de resistividad con contenido de agua

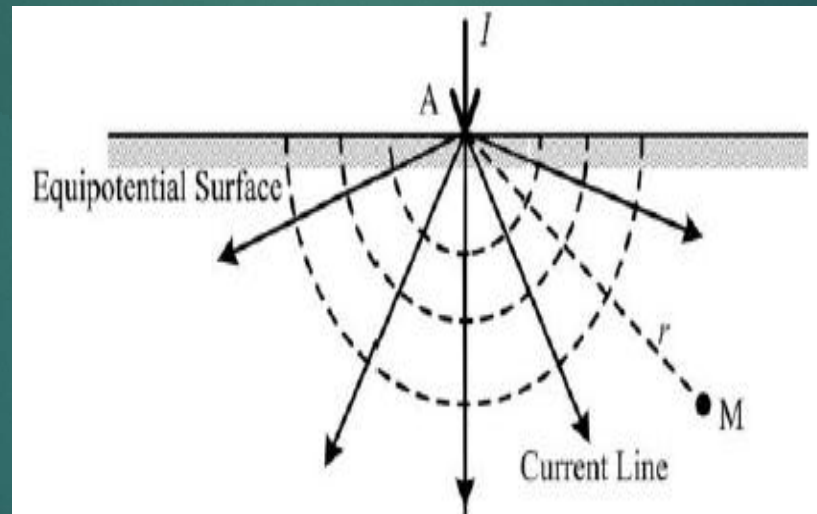
Efecto de la temperatura y el contenido de agua sobre la resistividad de la arena.



Medida de resistividad

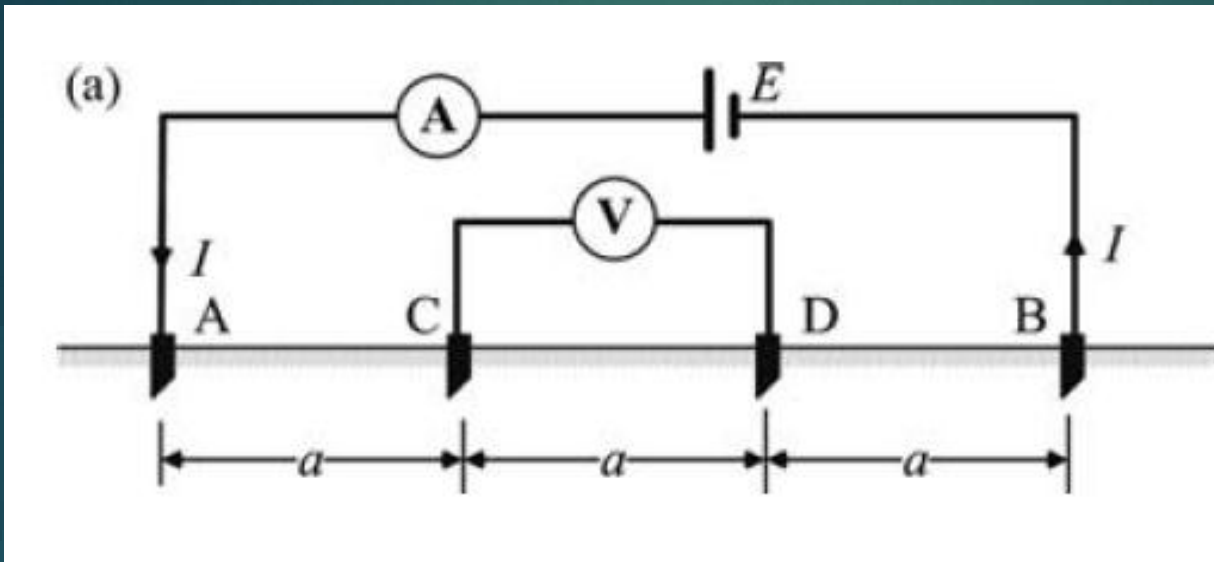
- ▶ Potencial generado por la inyección de corriente en un suelo de resistividad ρ :

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



- ▶ A partir de esta consideración teórica, se puede fundamentar la medición por el método de Wenner.

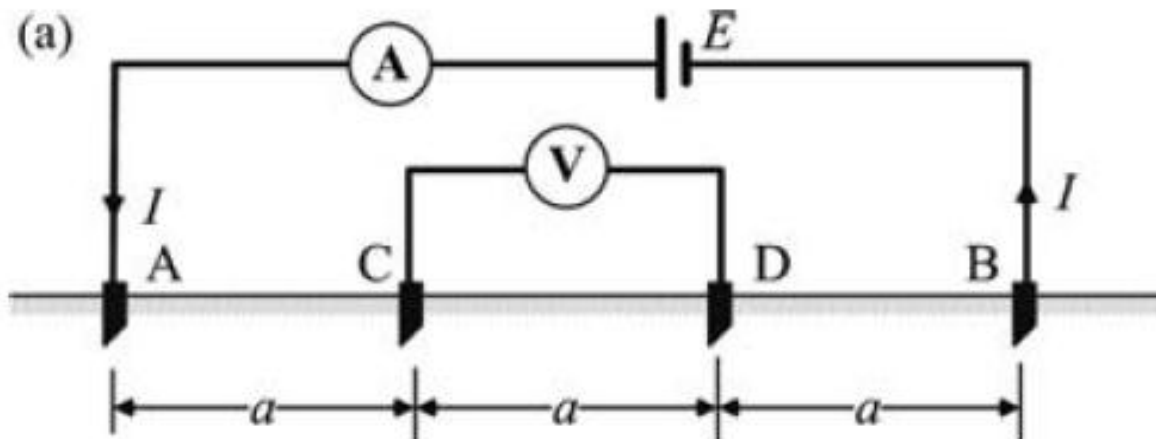
Medida de resistividad Wenner en suelo uniforme



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

- ▶ Se inyecta corriente entre los terminales A-B y se mide la diferencia de potencial C-D.
- ▶ La distancia entre todos los electrodos es a .
- ▶ El telurímetro devuelve la medida $R = V_{CD}/I$.

Medida de resistividad Wenner en suelo uniforme



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

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{2a}$$

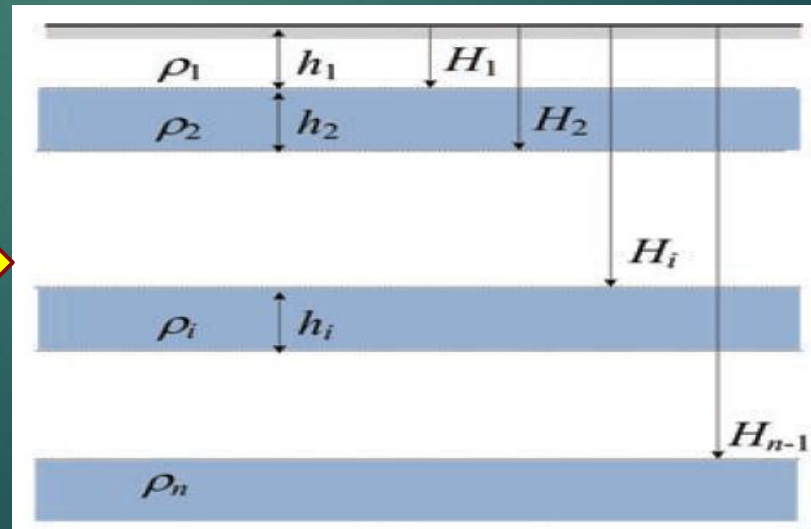
$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{2a}$$

$$V_{CD} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{a} \Rightarrow \rho = 2\pi a \frac{V_{CD}}{I}$$

Medida de resistividad Wenner en suelo genérico

- ▶ ¿Qué sucede en el caso que se tomen medidas en un suelo general?
- ▶ ¿Qué significado tiene la expresión de la resistividad?

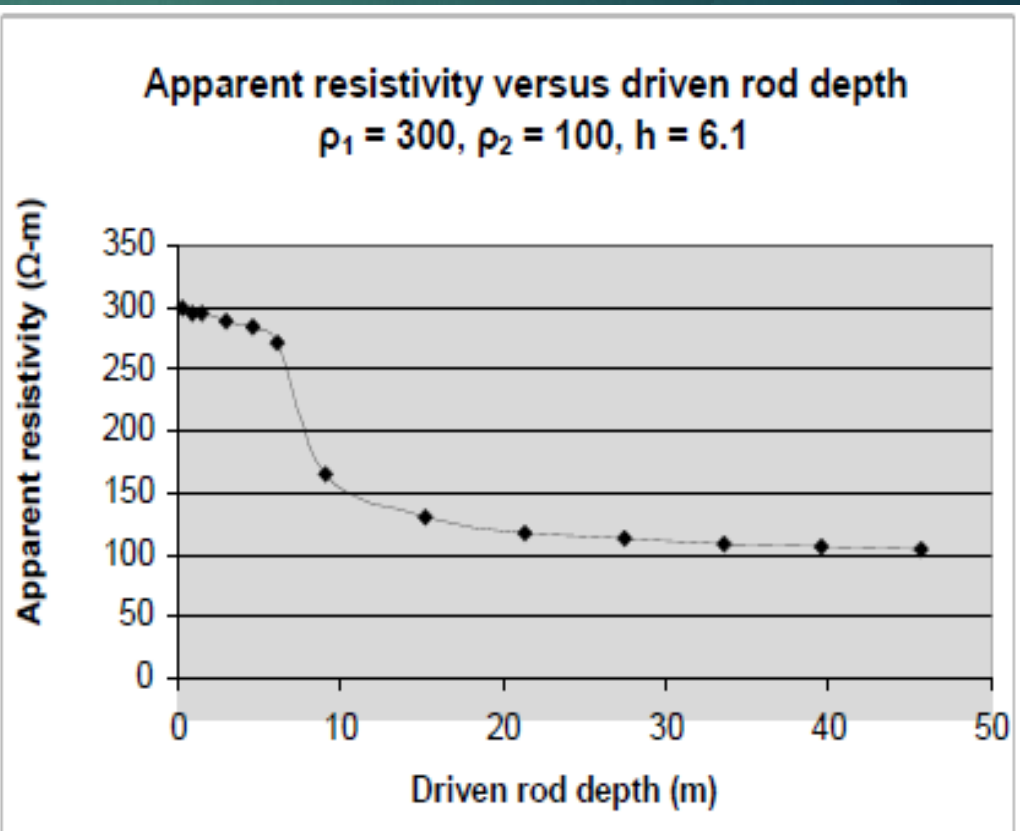
$$\rho_{ap}(a) = 2\pi a R$$



Medida de resistividad Wenner en suelo genérico

$$\rho_{ap}(a) = 2\pi aR$$

Rod depth m (ft)	$\rho_1 = 300, \rho_2 = 100, h = 6.1 \text{ m (20 ft)}$	
	Resistance (Ω)	Apparent resistivity ($\Omega\text{-m}$)
0.3 (1.0)	647.60	299.3
0.9 (3.0)	270.60	296.5
1.5 (5.0)	177.10	294.7
3.0 (10.0)	97.63	290.0
4.5 (15.0)	67.85	284.5
6.1 (20.0)	50.82	272.6
9.1 (30.0)	21.77	165.8
15.2 (50.0)	10.91	129.7
21.3 (70.0)	7.41	118.4
27.4 (90.0)	5.64	112.5
33.5 (110.0)	4.57	108.9
39.6 (130.0)	3.84	106.1
45.7 (150.0)	3.32	104.2

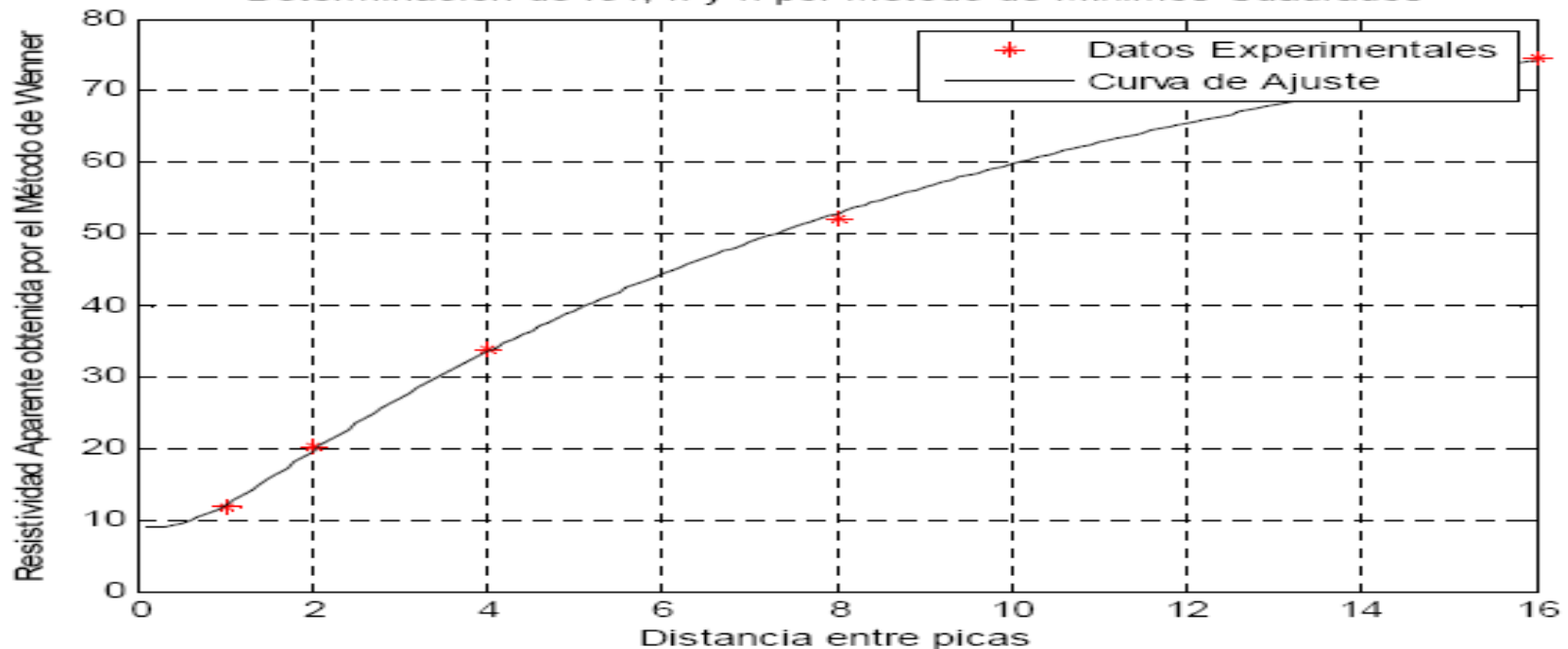


Medida de resistividad

12

Distancia	Resistividad			Media
	Direccion 1	Direccion 2	Direccion 3	
1.00 m	11.53 Ωm	12.10 Ωm	12.00 Ωm	11.88 Ωm
2.00 m	20.11 Ωm	19.29 Ωm	21.36 Ωm	20.25 Ωm
4.00 m	33.68 Ωm	33.05 Ωm	34.43 Ωm	33.72 Ωm
8.00 m	51.77 Ωm	50.27 Ωm	54.29 Ωm	52.11 Ωm
16.00 m	88.97 Ωm	51.77 Ωm	82.44 Ωm	74.39 Ωm

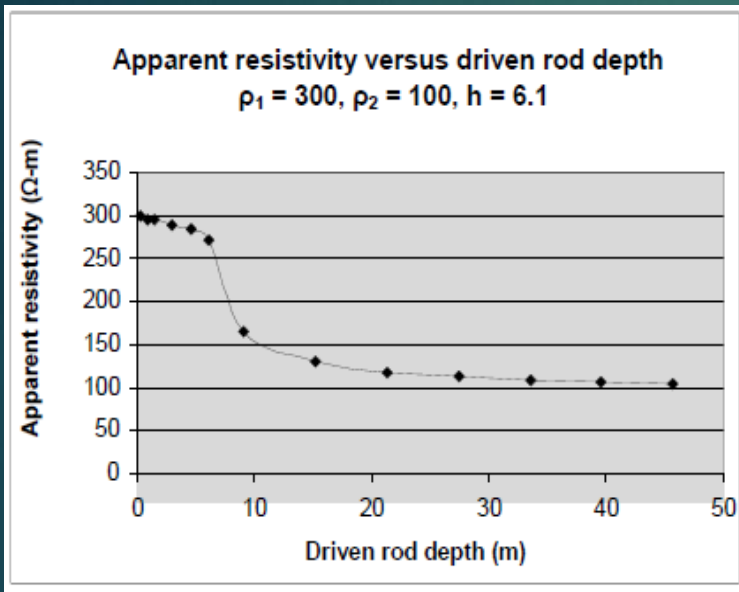
Determinación de ρ_1 , k y h por Método de Mínimos Cuadrados



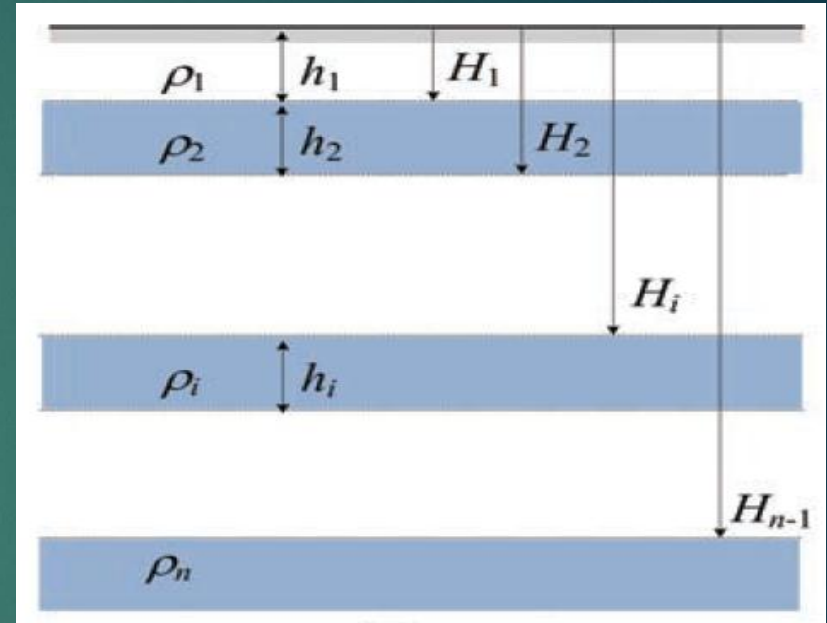
Medida de resistividad Wenner en suelo genérico

- ▶ A partir de la curvas de $\rho_i(h)$, y si no existen medidas que denoten importantes estratificaciones verticales, se puede deducir una única curva $\rho(h)$.
- ▶ A partir de esta, se deducen la cantidad de capas, la profundidad de cada una: (ρ_i, h_i) .
- ▶ Por último, se realiza la reducción al modelo de resistividad aparente utilizando el método de Endrenyi $(\rho_i, h_i) \rightarrow \rho_{ap}$

Medida de resistividad Wenner en suelo genérico



Tagg



ρ_{ap}

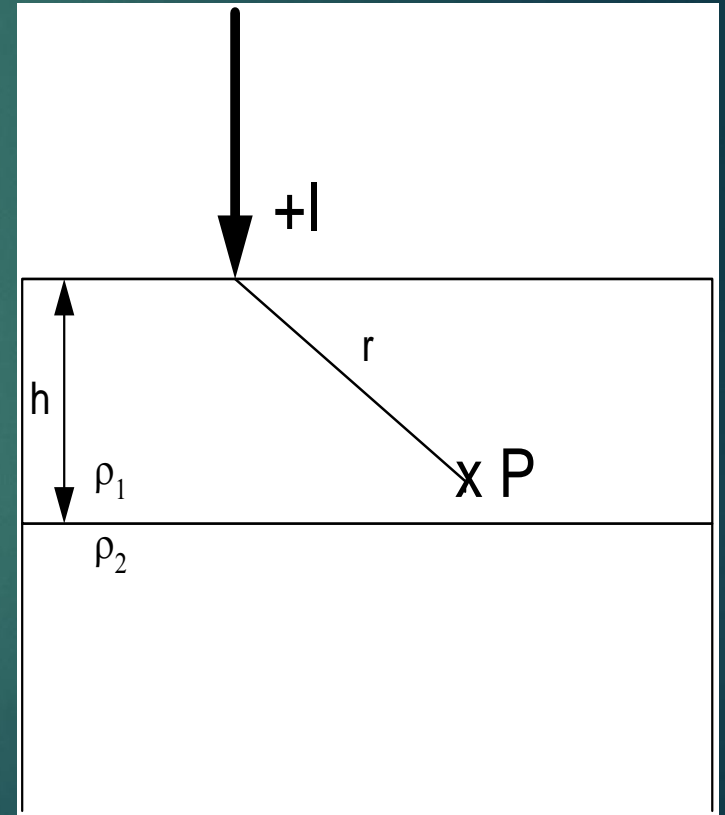
Endrenyi

Caso particular. Suelo de dos capas

- Método de Tagg.

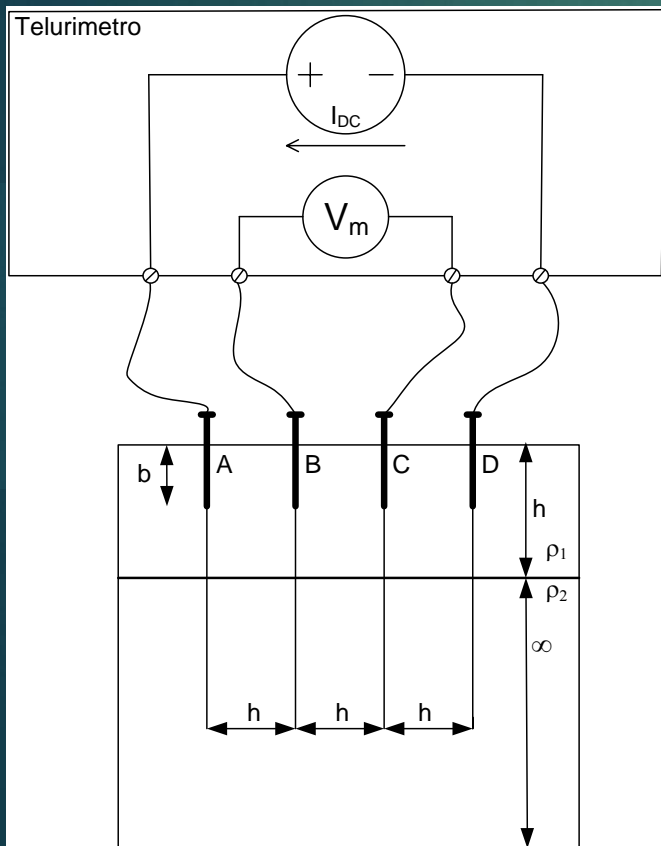
$$V_P = \frac{I \times \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right]$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$



Caso particular. Suelo de dos capas

► Método de Tagg.



$$V_{BC} = \frac{I \times \rho_1}{2\pi h} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n)^2}} \right] \right\}$$

$$\rho(h) = 2\pi h R$$

$$M(h) = \frac{\rho(h)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n)^2}} \right]$$

Medida de resistividad

Alcance del modelado

- ▶ El suelo puede ser representado mediante una resistencia y como un dieléctrico con un determinado punto de disrupción.
- ▶ Los cálculos se abordan para garantizar integridad personal frente a corrientes de cortocircuito (50 Hz), por lo tanto, **es posible modelar el terreno como resistencia.**

Mallas de tierra

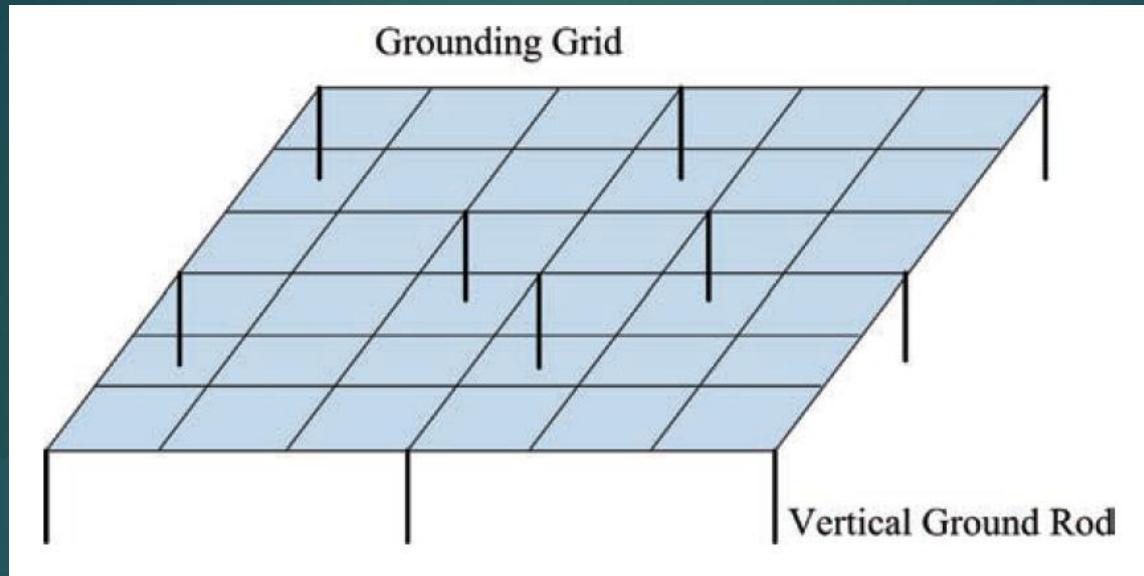
Modelado

- ▶ Estrictamente, los conductores de la malla deben modelarse por un circuito $\Pi - RLC$.
- ▶ Dado que el cortocircuito es un fenómeno de baja frecuencia, se desprecia el término LC, por lo que los conductores se modelan solamente como una resistencia.

Como el medio y los conductores se modelan como resistencias, la impedancia de puesta a tierra se asume como una resistencia pura.

Mallas de tierra

19



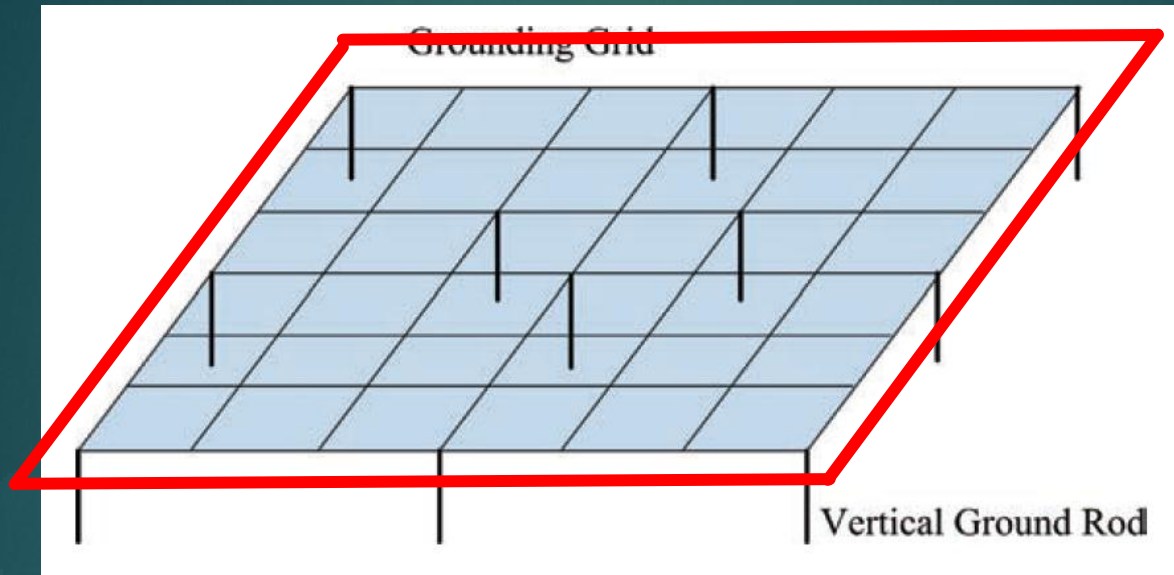
SUBESTACIONES EN MT

- ▶ Arreglo de conductores de cobre desnudo dispuestos horizontalmente y soldados en intersecciones.
- ▶ Grilla rectangular 2.5m y 10m dependiendo del área.
- ▶ Generalmente soldadas jabalinas en el perímetro.
- ▶ Enterradas entre 0.5m y 1.5m.
- ▶ Recubierta con piedra partida entre 10cm y 20cm.

Mallas de tierra

20

SUBESTACIONES EN MT



- ▶ Anillo perimetral unido a la malla, situado entre 1.0m y 1.5m para la minimización de tensiones transferidas.
- ▶ Salvo en casos especiales, se utiliza el cobre: alta conductividad, alta resistencia a la corrosión y alto punto de fusión.

¿Cómo se calcula la resistencia?

Calculo de resistencia de mallas de tierra

- ▶ Un sistema ideal de puesta a tierra, debería tener una resistencia prácticamente nula. Con esto, se asegura que el GPR sea muy pequeño y por lo tanto la tensión de contacto nula.
- ▶ Sin embargo, una resistencia alta, no es sinónimo de mal diseño en alta tensión, cuando se prioriza la seguridad personal.
- ▶ Valores usuales: 1-10 Ω para sistemas hasta 60kV.
< 5 Ω para sistemas >60kV.

Calculo de resistencia de mallas de tierra

22

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ Sin embargo, un valor de resistencia pequeño, sigue siendo un factor importante cuando se consideran:

- 1) Las tensiones transferidas hacia afuera del perímetro de la estación.

- 2) La aislación de los equipos electrónicos o de comunicaciones que forman parte de la instalación.

Calculo de resistencia de mallas de tierra

- ▶ Varias posibles expresiones para estimar la resistencia de puesta a tierra según IEEE-80:

FORMULA DE SVERAK:

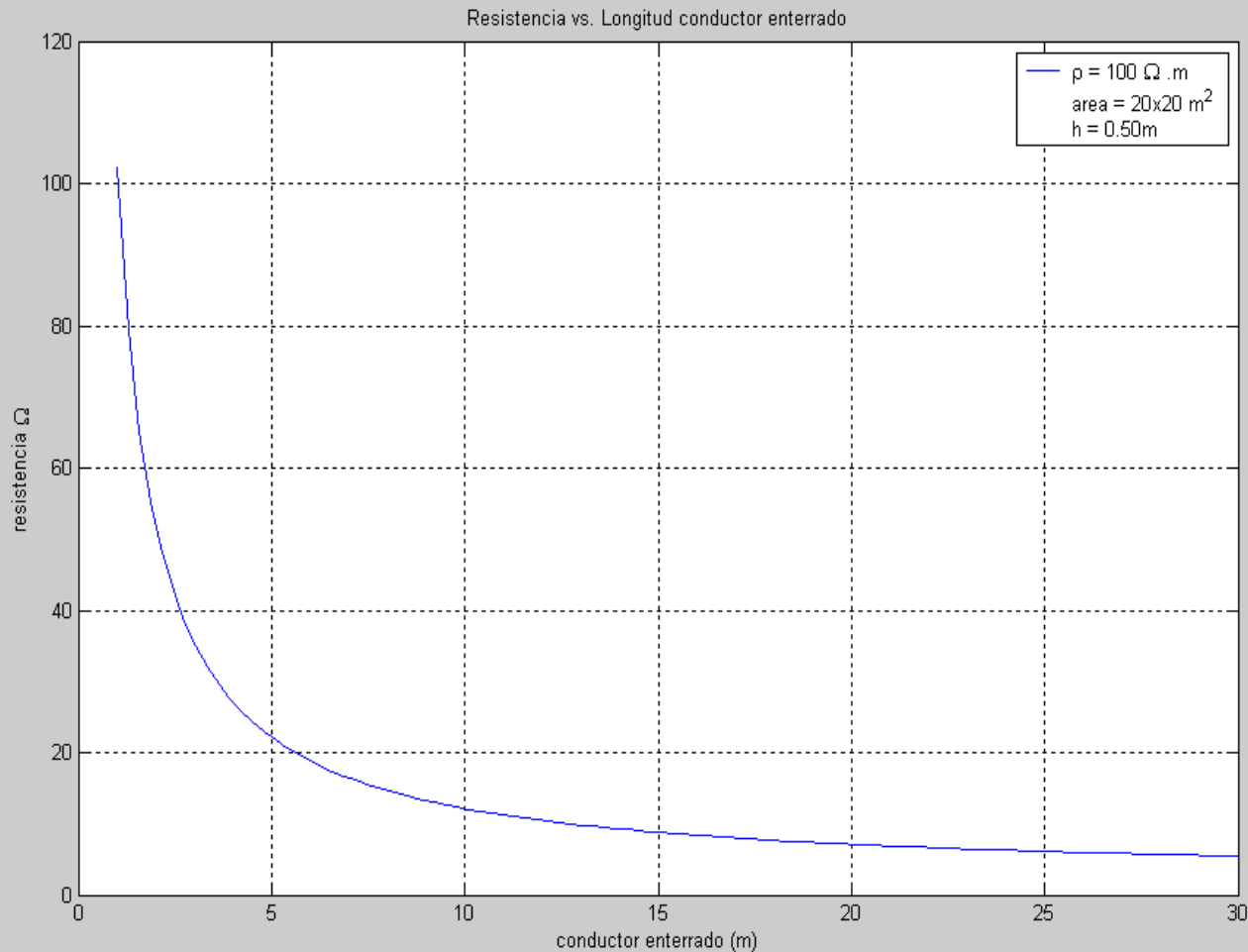
$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

- ▶ Factores determinantes:
 - 1) La resistividad aparente del terreno.
 - 2) El área ocupada por el sistema de PAT.
- ▶ Observar la limitada influencia de L.

Calculo de resistencia de mallas de tierra

24

SUBESTACIONES EN MT



Mallas de tierra

Dimensionado

- ▶ Los conductores deben soportar sin fundirse la máxima corriente de cortocircuito prevista:

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{\frac{t_c a_r \rho_r 10^4}{\text{TCAP}}}{\text{Ln} \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

- ▶ El proceso de calentamiento de los conductores se supone adiabático, es decir, que no se irradia calor hacia el suelo.
- ▶ Secciones típicas para mallas de tierra: entre 35mm^2 y 120mm^2 .

Mallas de tierra Dimensionado

26

SUBESTACIONES EN MT

I = corriente rms en kA

A = sección de conductor en mm^2

T_m = máxima temperatura en $^{\circ}\text{C}$

T_a = temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$

T_r = temperatura de referencia para los materiales en $^{\circ}\text{C}$

α_0 = coeficiente térmico de la resistividad a 0°C

α_r = coeficiente térmico de la resistividad a T_r

ρ_r = la resistividad del conductor a T_r en $\mu\Omega - \text{cm}$

$K_0 = 1/\alpha_0$

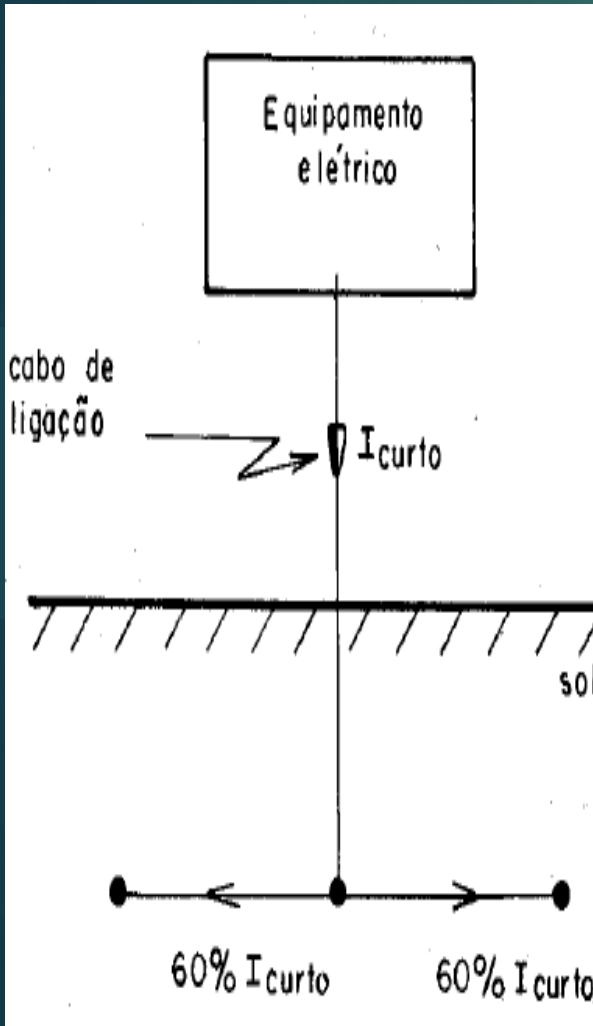
t_c = tiempo de circulación de la corriente en s

TCAP = factor de capacidad térmica en $\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$

Mallas de tierra Dimensionado

27

SUBESTACIONES EN MT



- ▶ Dimensionado de los conductores conforme a la distribución de la corriente de cortocircuito.
- ▶ Observar que en este caso, no aplica el "Split Factor" en la corriente de cortocircuito calculado.