

PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN

Parte 5 – Modelado del terreno

AÑO 2016

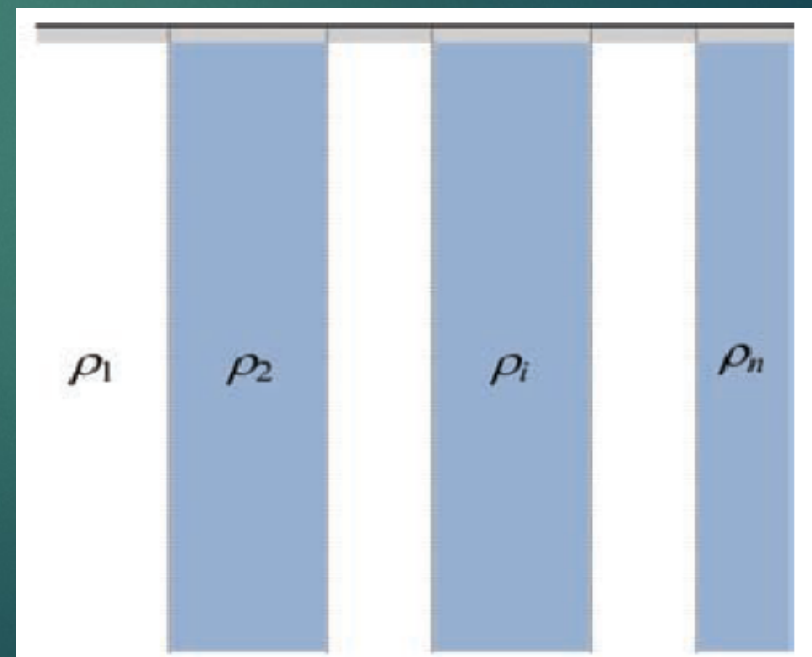
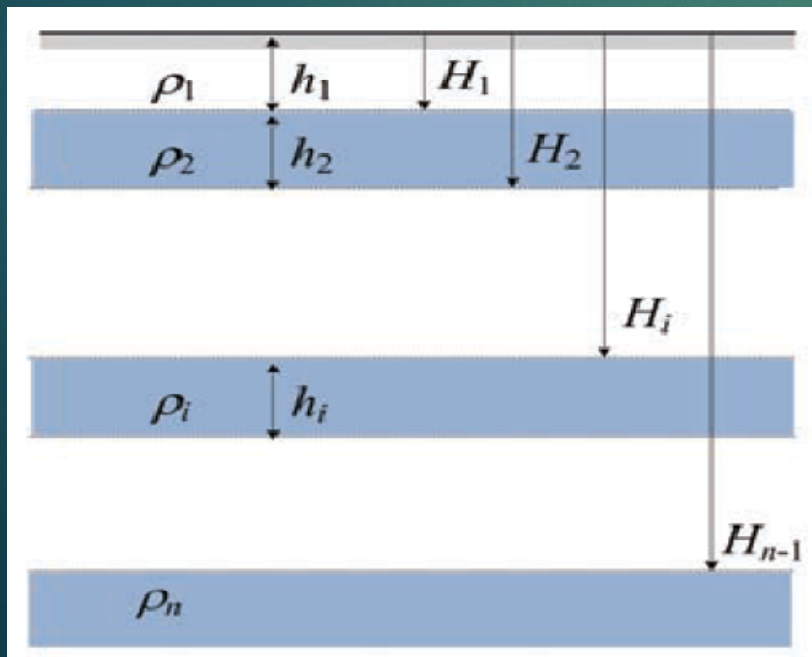
(BASADO CURSO 2015 FERNANDO BERRUTTI)

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.

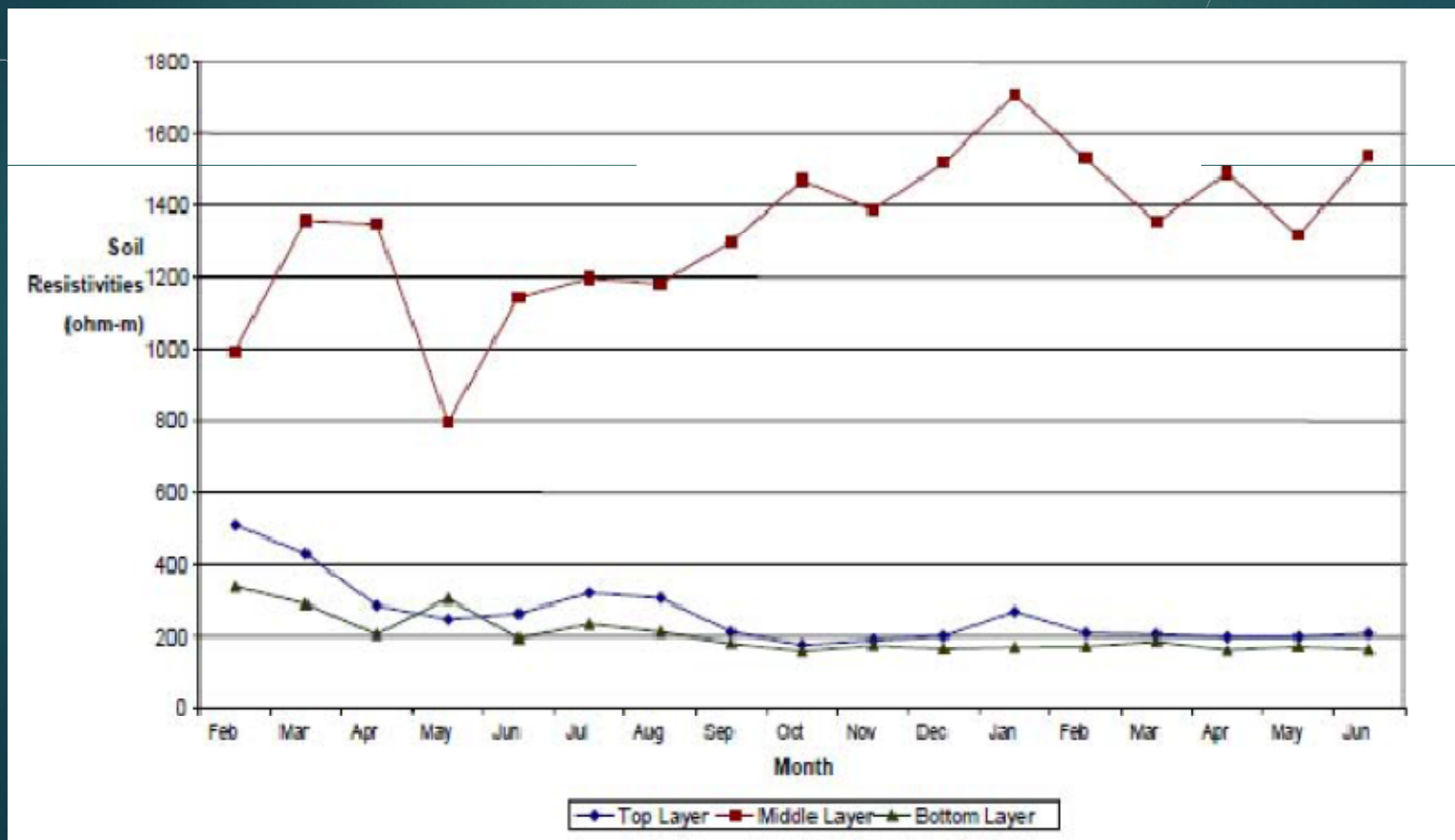
Importancia de la medida de resistividad del suelo

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



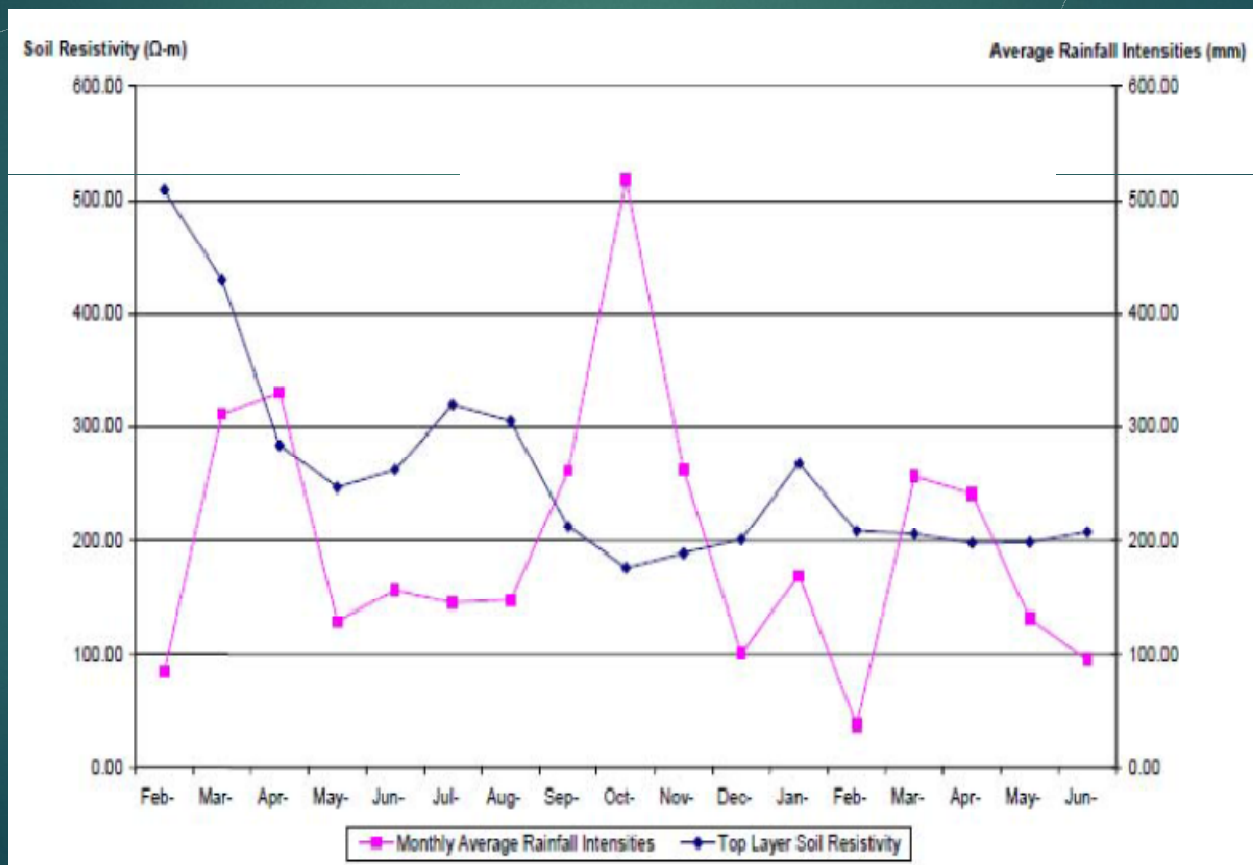
Variación de resistividad en el tiempo

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



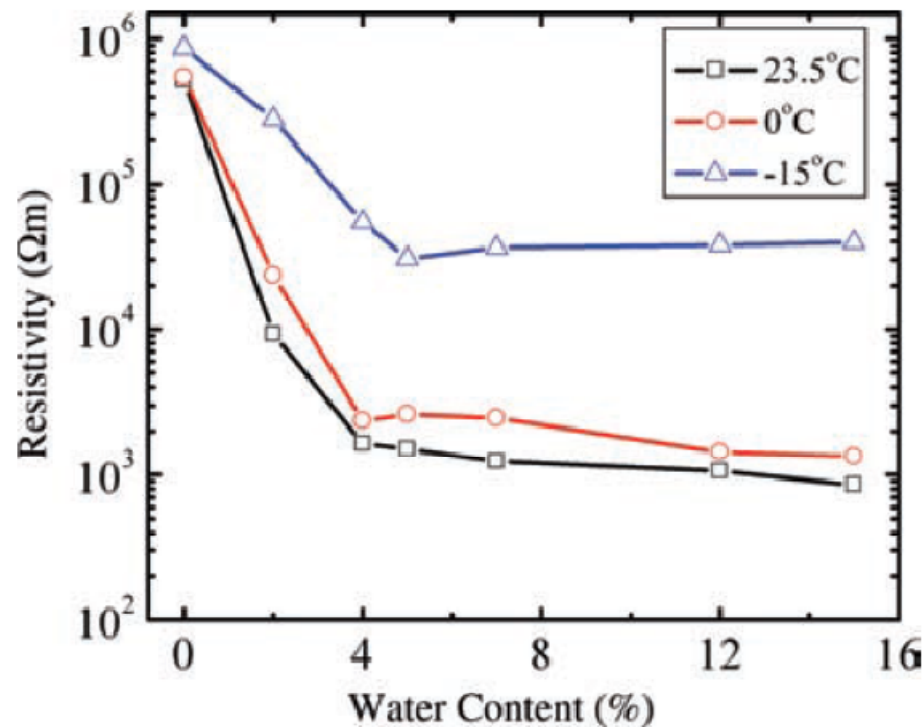
Variación de resistividad con las precipitaciones

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



Variación de resistividad con contenido de agua

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

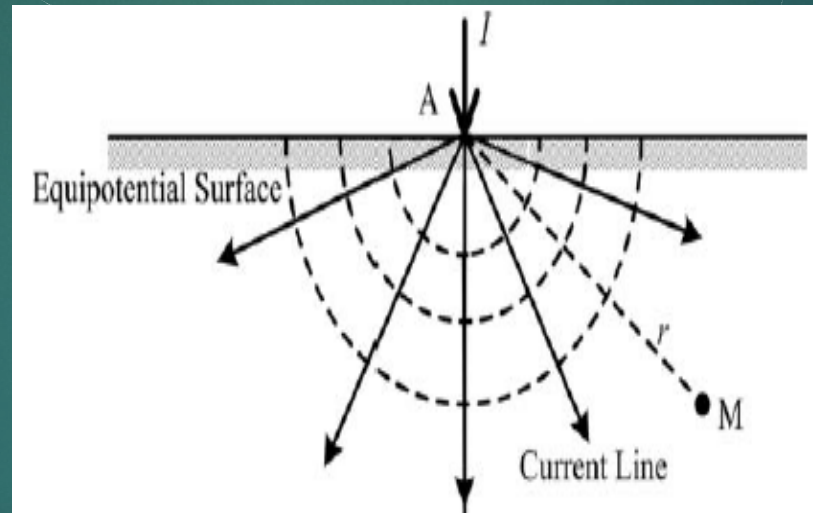


Medida de resistividad

7

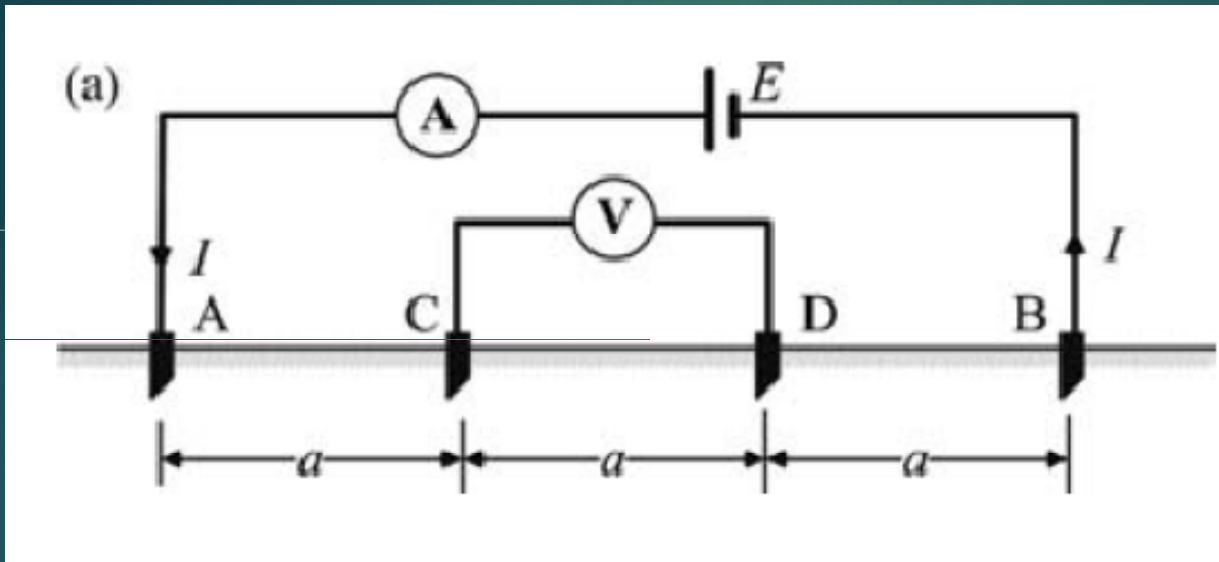
- ▶ Potencial generado por la inyección de corriente en un suelo de resistividad ρ :

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



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

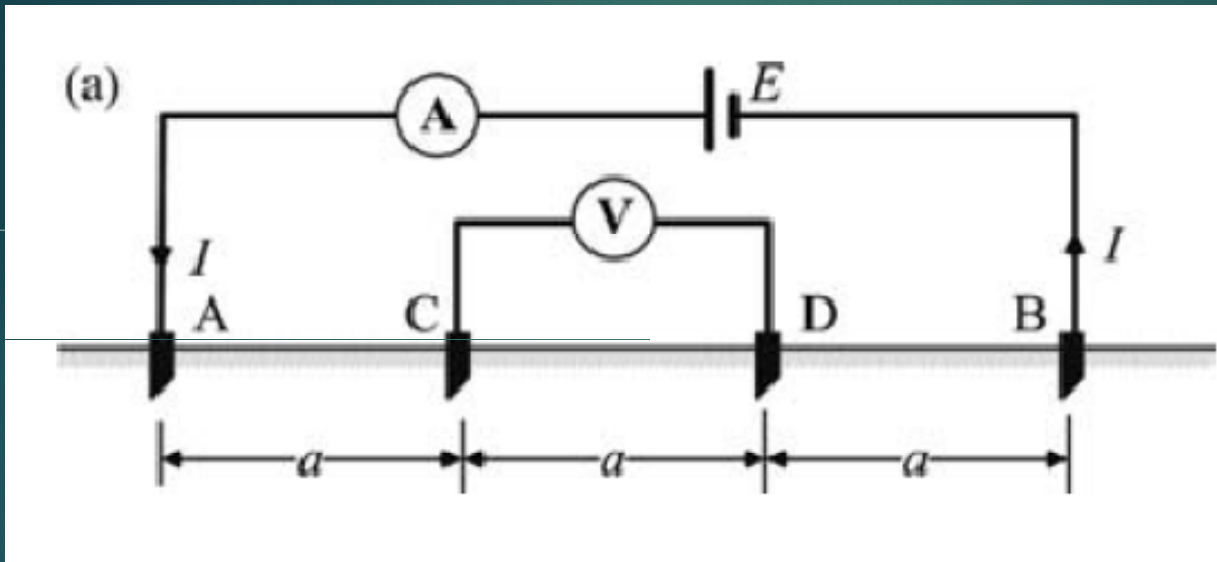
Medida de resistividad Wenner en suelo uniforme



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

- ▶ 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



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

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

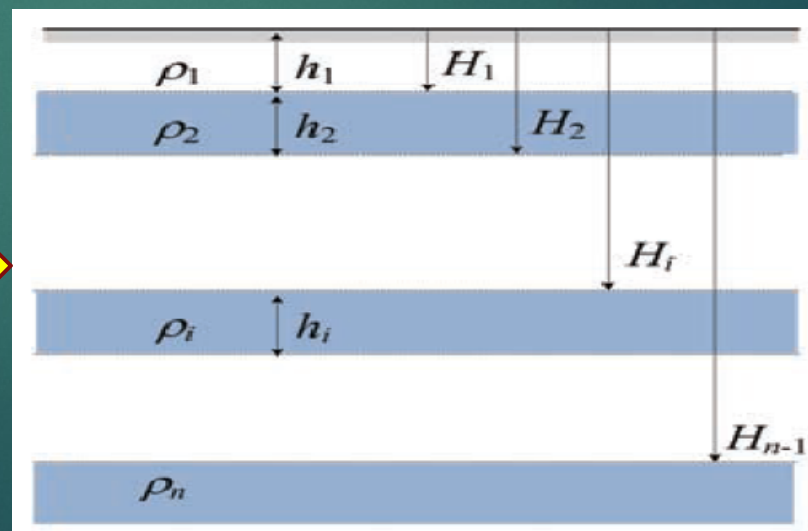
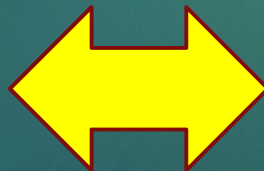
$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{2a}$$

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

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?

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



Estratificación del suelo

11

- ▶ El modelo en capas estratificadas (capas horizontales) ha producido excelente resultados comprobados en la práctica.
- ▶ MODELO EN DOS CAPAS.
- ▶ Utilizando la teoría del electromagnetismo en un suelo de capas horizontales, y con el auxilio de las medidas efectuadas por el método de Wenner, es posible encontrar tanto la resistividad de ambas capas, y la profundidad respectiva.

Estratificación del suelo

12

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ Sea I una corriente eléctrica entrando por un punto A , en un suelo de dos capas. Esta corriente genera potenciales en la primera capa, debiéndose satisfacer la ecuación de Laplace
- ▶ $\nabla^2 V = 0$, siendo V el potencial en la primera capa.
- ▶ Resolviendo la ecuación de Laplace relativa al potencial V en un punto p de la primera capa, separado una distancia r de la fuente de corriente A , se obtiene la ecuación:

Estratificación del suelo

13

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ Siendo:
- ▶ V_p = potencial en un punto P de la primer capa relativa al infinito.
- ▶ ρ_1 = resistividad de la primer capa
- ▶ h = profundidad de la primer capa
- ▶ r = distancia del punto P a la fuente de corriente A
- ▶ K = coeficiente de reflexion definido por:
- ▶ $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$
- ▶ ρ_2 = resistividad de la segunda capa

Estratificación del suelo

14

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

SUBESTACIONES EN MT

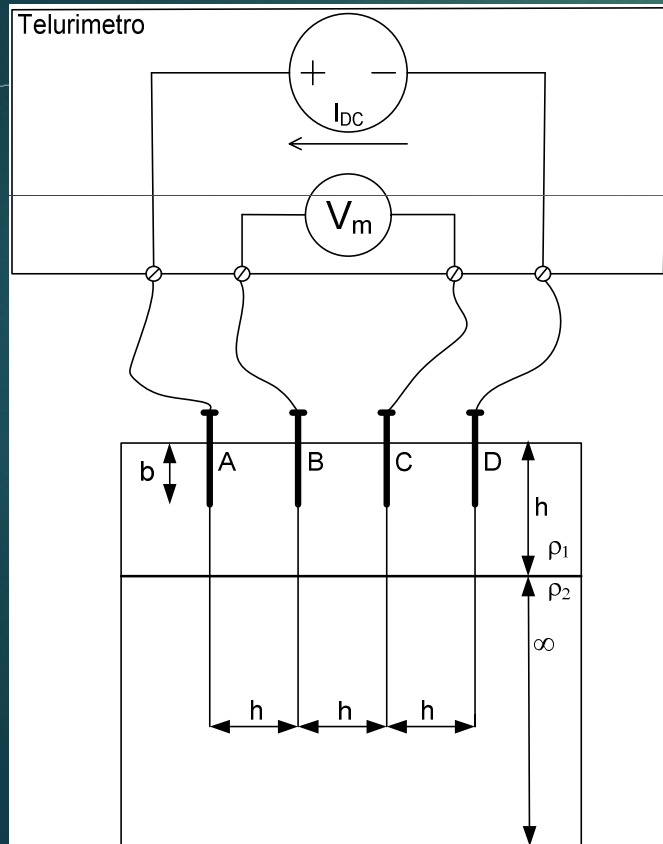
Modelado de dos capas

15

- ▶ La resistividad aparente para un terreno de dos capas, en función de las resistividades de ambas capas ρ_1 , ρ_2 , profundidad de la primera capa h , y la separación a entre jabalinas según el método de Wenner, se expresa como:

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

Caso particular. Suelo de dos capas



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

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

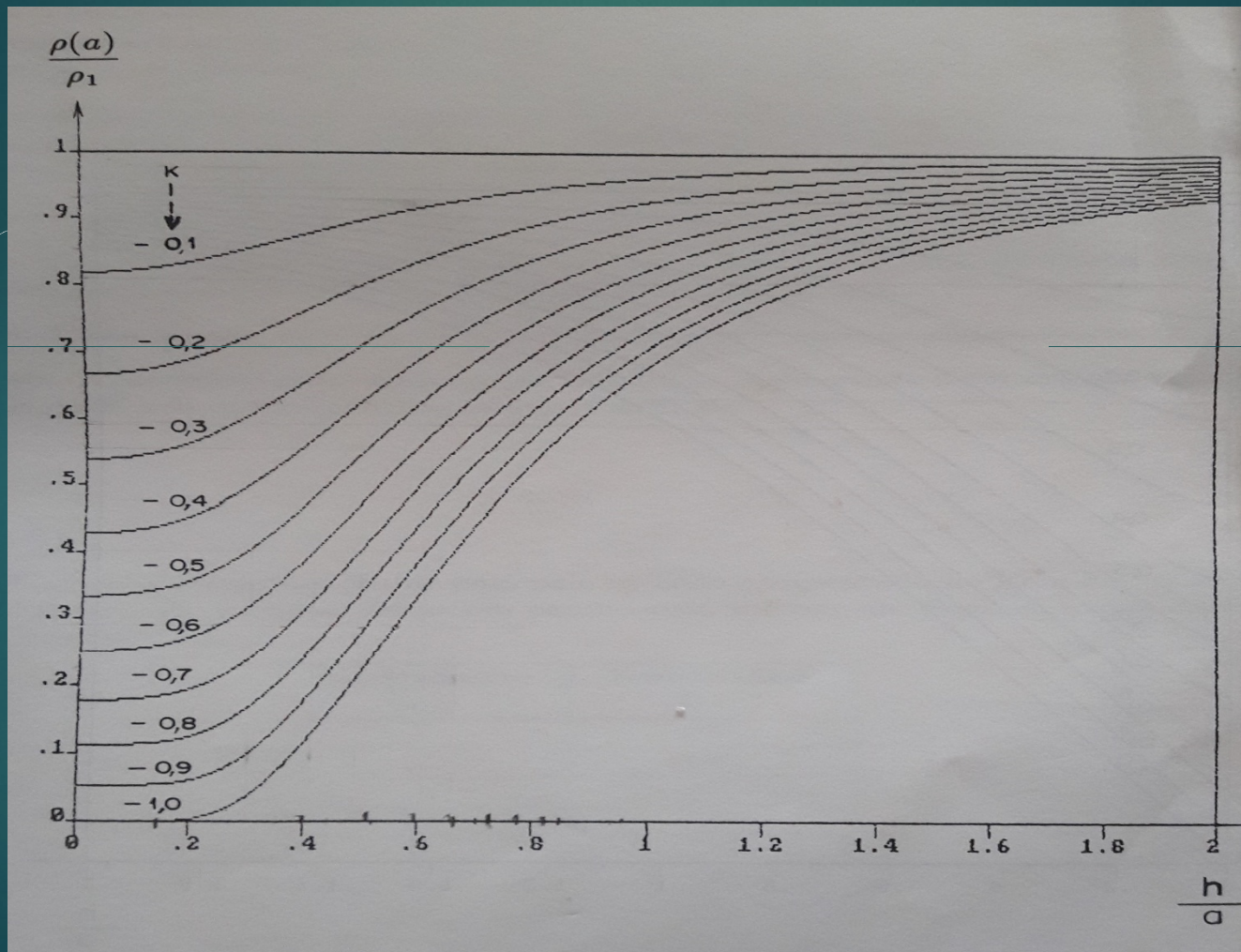
$$M(h) = \frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2nh/a)^2}} \right]$$

Metodo de dos capas usando curvas

- ▶ 1.- Se traza un grafico $\rho(a)$ vs a obtenida por Wenner.
- ▶ 2.- Se prolonga esta curva hasta cortar con el eje de las ordenadas, obteniendose ρ_1 .
- ▶ 3.- Se elige un valor arbitrario a_1 , y de la curva se obtiene $\rho(a_1)$.
- ▶ 4.- Si la curva fue ascendente, $k < 0$, y se calcula $\rho(a_1)/\rho_1$.
- ▶ 5.- Si la curva fue descendente, $k > 0$, y se calcula $\rho_1/\rho(a_1)$.

Curvas para K negativos

18

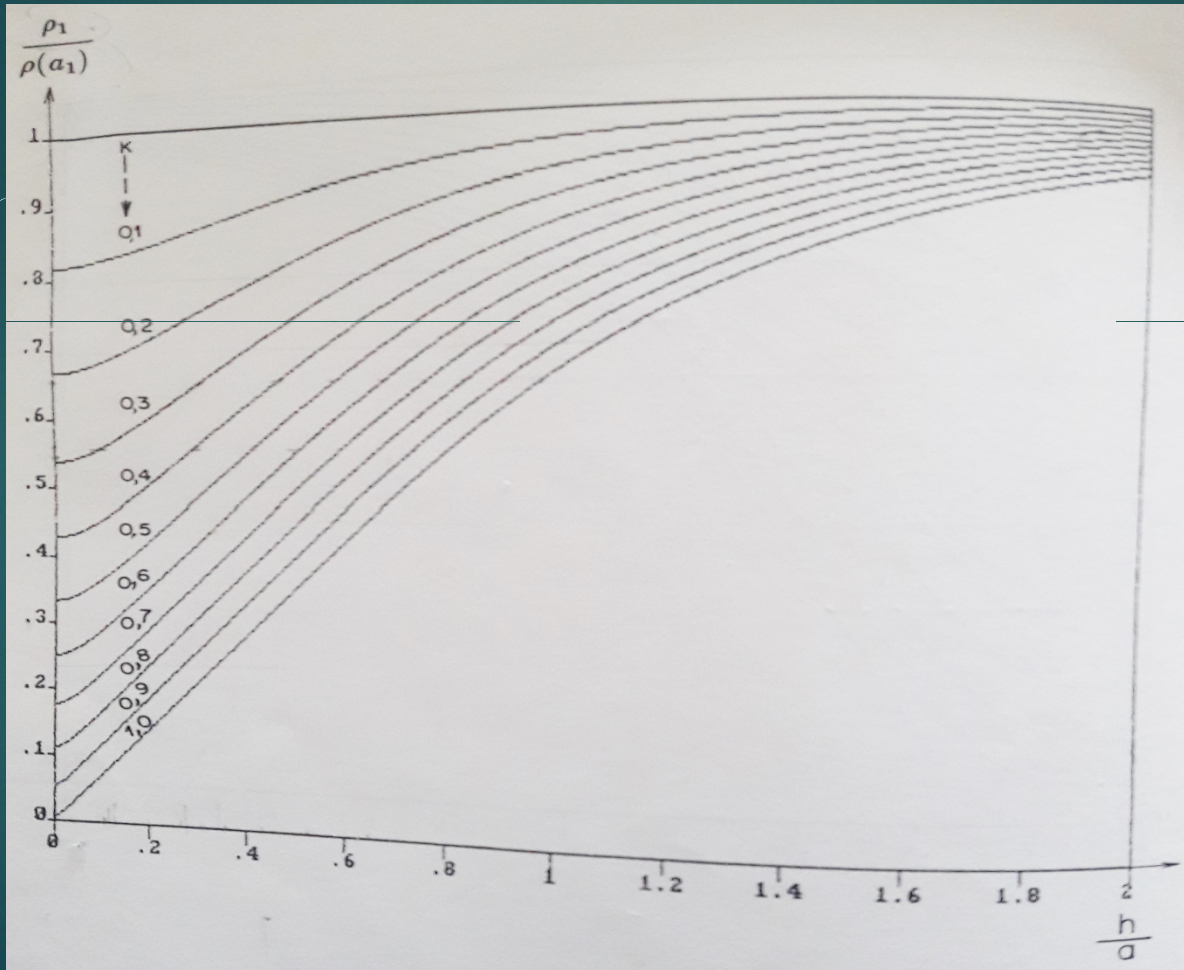


SUBESTACIONES EN MT

Curvas para K positivos

19

SUBESTACIONES EN MT

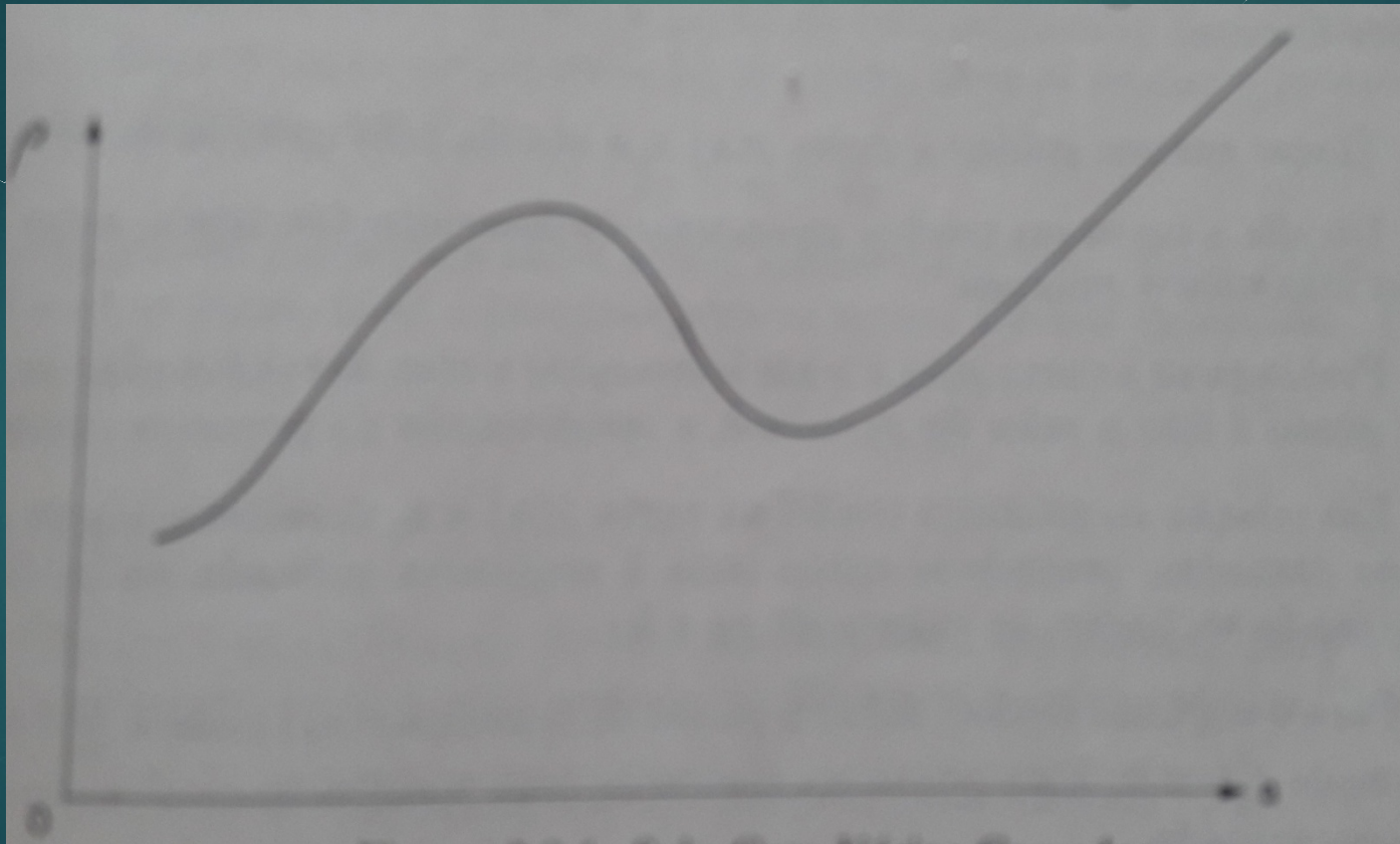


Metodo de dos capas usando curvas

- ▶ 6.- Con los valores obtenidos en 5 o 6, según el caso, se ingresa a la grafica teorica, y se traza una linea paralela al eje de las abcisas. Esta recta corta distintas curvas de K, obteniendose distintos valores de K y h/a . Se multiplican estos valores por el valor de a_1 del paso 3. Se obtuvieron valores de K, h/a , y h.
- ▶ 7.- Se grafica K vs h.
- ▶ 8.- Se repite el procedimiento para otro valor a_2 .
- ▶ 9.- Se ingresa una nueva curva en el grafico indicado en 7.
- ▶ 10.-La interseccion de las curvas indican K y h.

Estratificación del suelo en varias capas

21



SUBESTACIONES EN MT

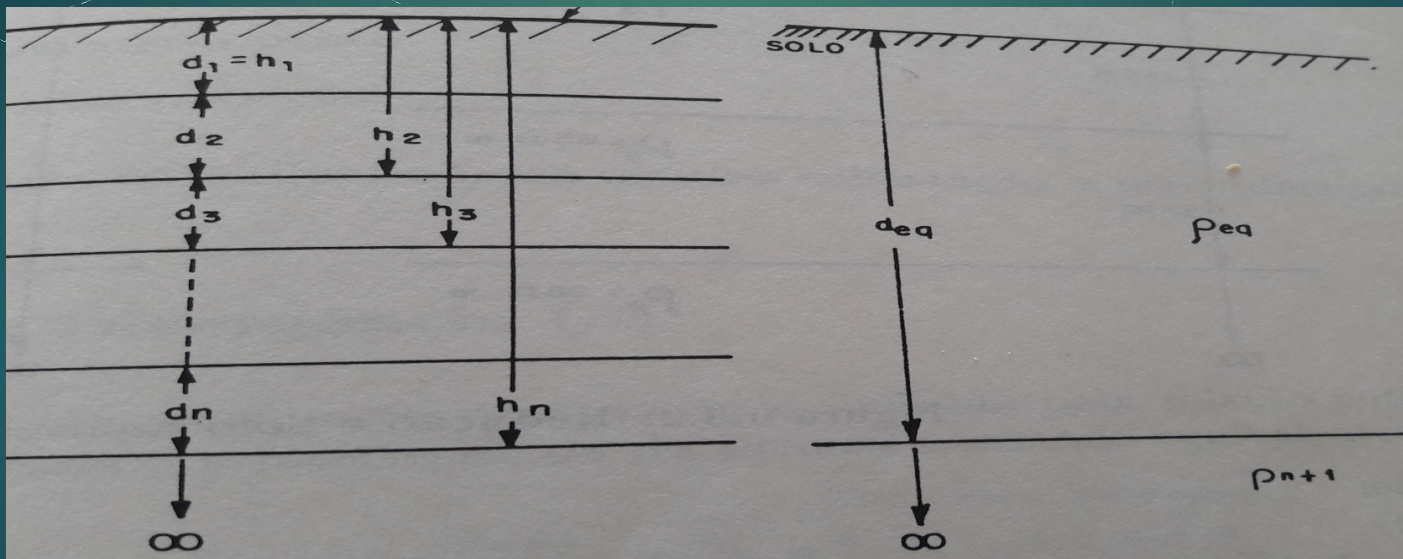
Estratificación del suelo en varias capas

- ▶ Se divide la curva en tramos típicos de suelos de dos capas.
- ▶ Metodo de Pirson.
- ▶ Se divide la curva en tramos ascendentes y descendentes.
- ▶ Se considera el primer tramo como un suelo de dos capas, obteniéndose ρ_1 , ρ_2 y h_1 . Al analizar el segundo tramo, se debe determinar la resistividad equivalente vista por la tercer capa. Así obtenemos ρ_3 y la profundidad de la capa equivalente h_2 . Así sucesivamente.

Estratificación del suelo en varias capas

23

SUBESTACIONES EN MT



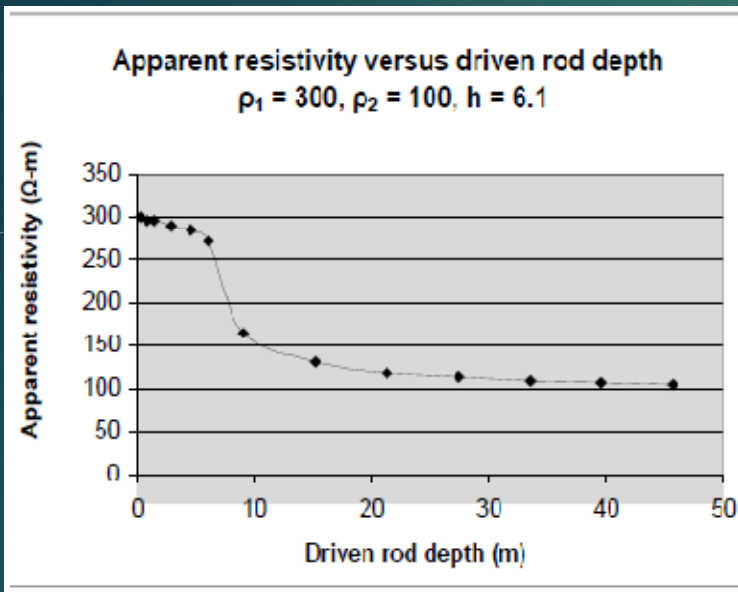
Estratificación del suelo en varias capas

- ▶ $d_1 = h_1$ = espesor de la primer capa
- ▶ d_2 = espesor estimado de la segunda capa
- ▶ h_2 = profundidad estimada de la segunda capa
- ▶ a_t = punto en el segundo tramo donde la curva cambia de concavidad.
- ▶ $h_2 = d_1 + d_2 = (2/3) * a_t$.
- ▶ ρ_{1-2} = resistividad equivalente vista por la tercer capa
- ▶ $\rho_{1-2} = (d_1 + d_2) / (d_1 / \rho_1 + d_2 / \rho_2)$.

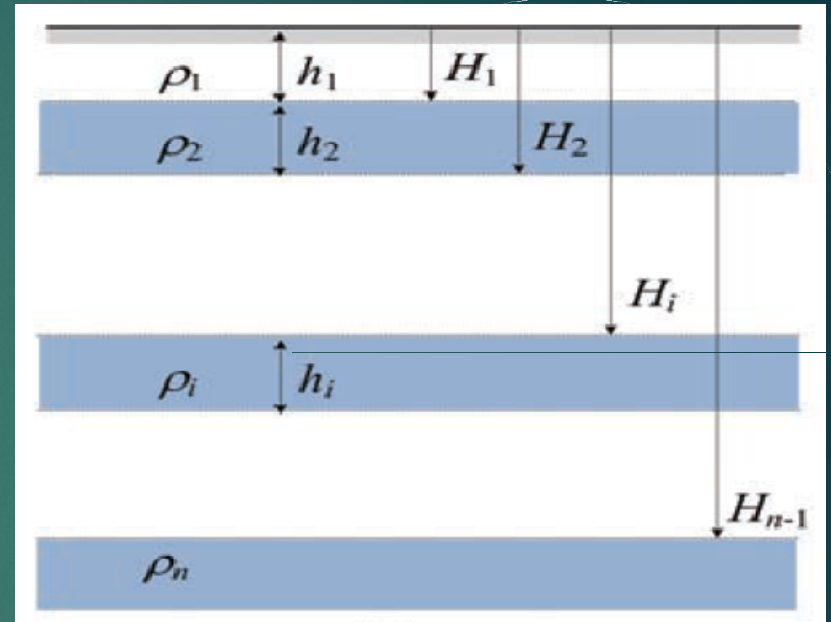
Medida de resistividad Wenner en suelo genérico

- ▶ 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

Resistividad aparente

27

- ▶ Un suelo que tiene varias capas, presentara resistividades diferentes para cada tipo de sistema de aterramiento.
- ▶ El pasaje de la corriente del sistema de aterramiento al suelo, depende de:
 - composición del suelo y sus diferentes capas
 - geometría del sistema de aterramiento
 - tamaño del sistema de aterramiento.

Resistividad aparente

28

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ Representa la resistividad vista por el sistema de aterramiento y su tamaño en relación con el suelo.
- ▶ El tamaño de un sistema de aterramiento tiene que ver con la profundidad de penetración de las corrientes a tierra. Esta penetración determina las capas de suelo involucradas con el aterramiento.
- ▶ Si se coloca un sistema de aterramiento en suelos distintos, se obtendrán resistencias eléctricas diferentes, ya que la resistividad que presenta el suelo al aterramiento es diferente.

Resistividad aparente

29

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ La resistencia de un sistema de aterramiento depende de:
- ▶ - la resistividad aparente que el suelo presenta a este aterramiento determinado.
- ▶ - la geometria y la forma como el sistema de aterramiento esta enterrado en el suelo.
- ▶ $R_{\text{aterramiento}} = \rho_a * f(g)$, siendo $f(g)$ un funcion que depende de la geometria y forma de colocacion en el suelo del sistema de aterramiento.

Reduccion de capas

30

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ El calculo de la resistividad aparente en un sistema de aterramiento se efectua considerando el nivel de penetracion de la corriente en un suelo de dos capas.
- ▶ Para obtener estas dos capas usamos la formula de Hummel:

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}}$$

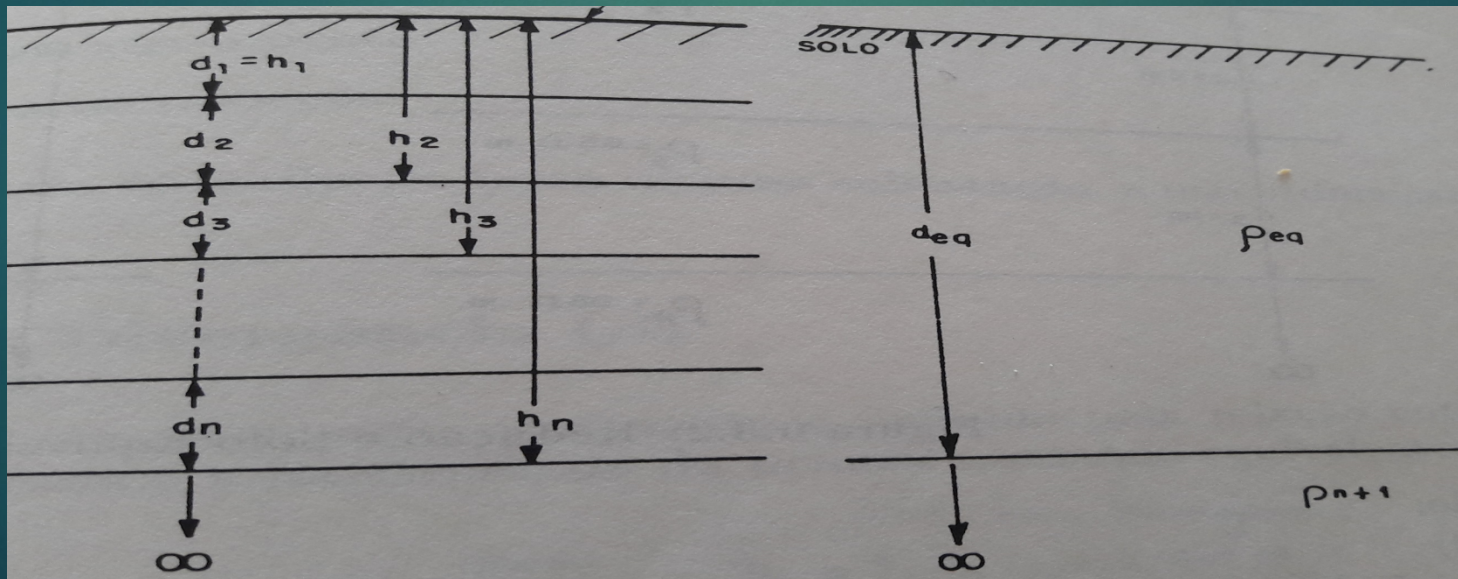
$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i$$

Reduccion de capas

31

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ Siendo d_i =espesor de la i -esima capa
- ▶ ρ_i = resistividad de la i -esima capa
- ▶ N = numero de capas a reducir



Coeficiente de penetracion (alfa)

- ▶ Indica el grado de penetracion de las corrientes del sistema de aterramiento en el suelo equivalente.
- ▶ $\alpha = r / r_{\text{equiv}}$.
- ▶ En general, $r =$ radio de un anillo equivalente del sistema de aterramiento
- ▶ En el caso de una malla rectangular, $r = A / D$,
- ▶ Siendo $A =$ area de la malla
- ▶ $D =$ mayor dimension del aterramiento.

Coeficiente de divergencia β

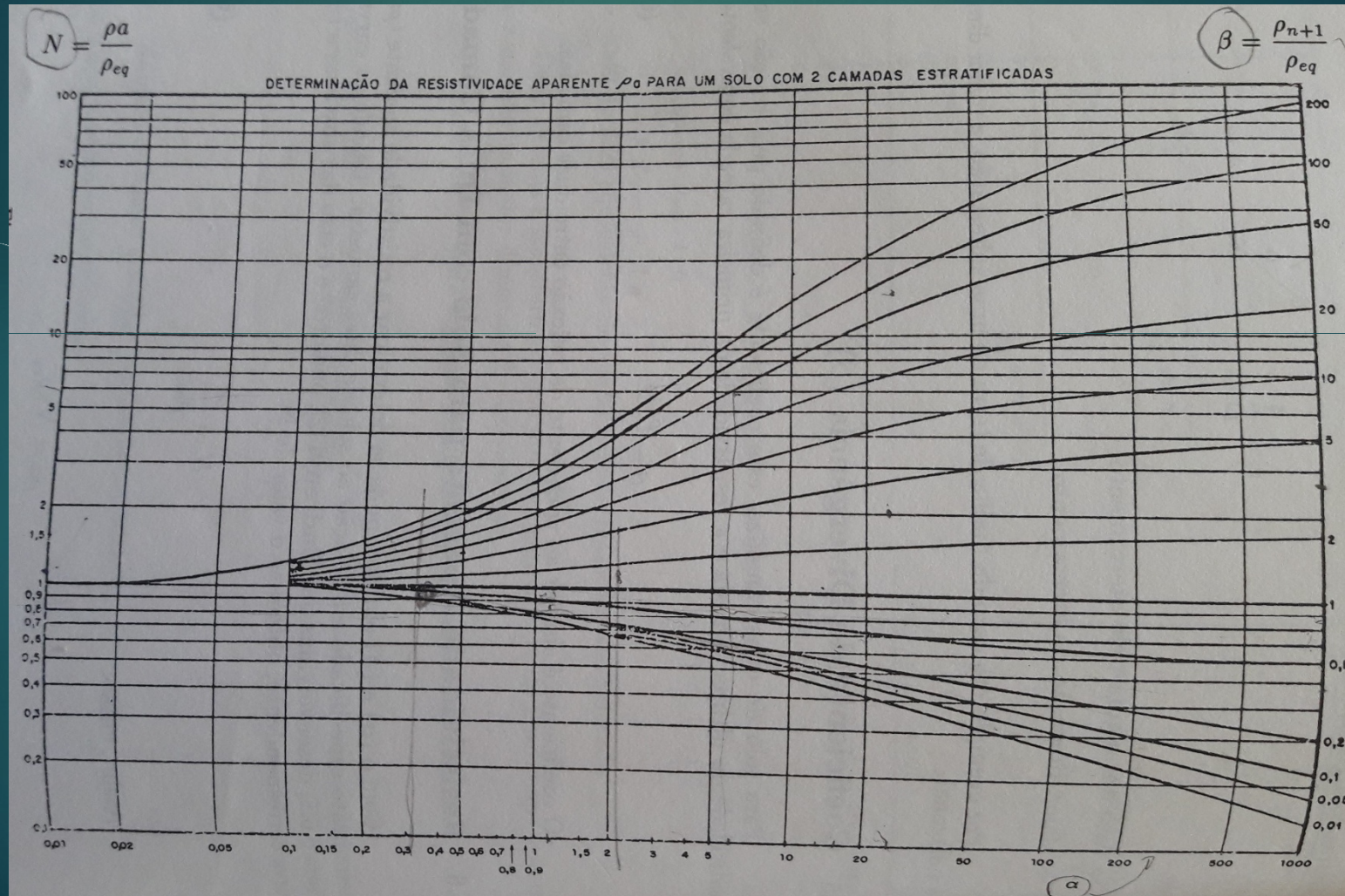
- ▶ Es la relación entre la resistividad de la última capa y la resistividad de la primera capa.

Resistividad aparente en un suelo de dos capas

- ▶ Con α y β , utilizando las curvas de Endrenyi, podemos obtener el valor de ρ_a .
- ▶ $N = \rho_a / \rho_{equiv}$
- ▶ $\rho_a = N * \rho_{equiv}$.
- ▶ A la curva de Endrenyi se entra con α y con β . Se obtiene N , y de allí se obtiene ρ_a .

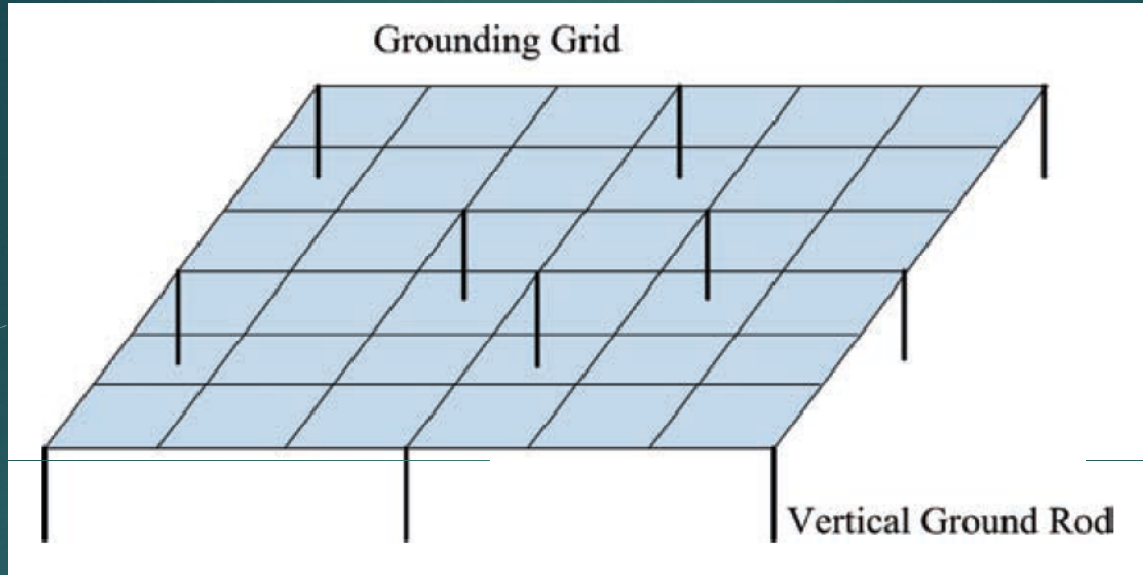
Curva de Endrenyi

35



Mallas de tierra

36



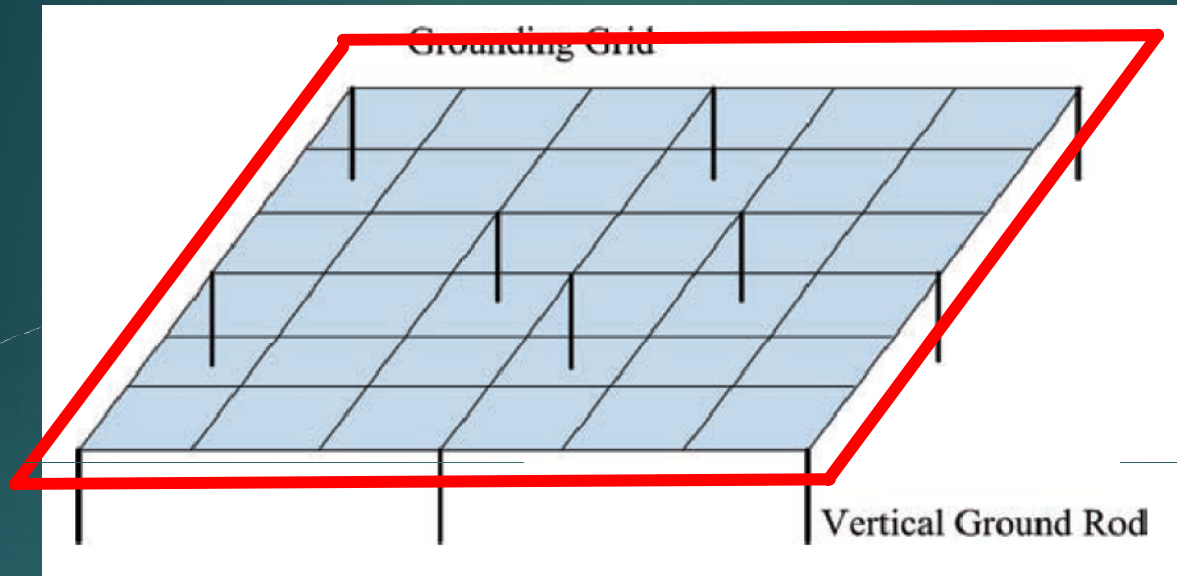
SUBESTACIONES EN MT

- ▶ 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

37

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

39

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:

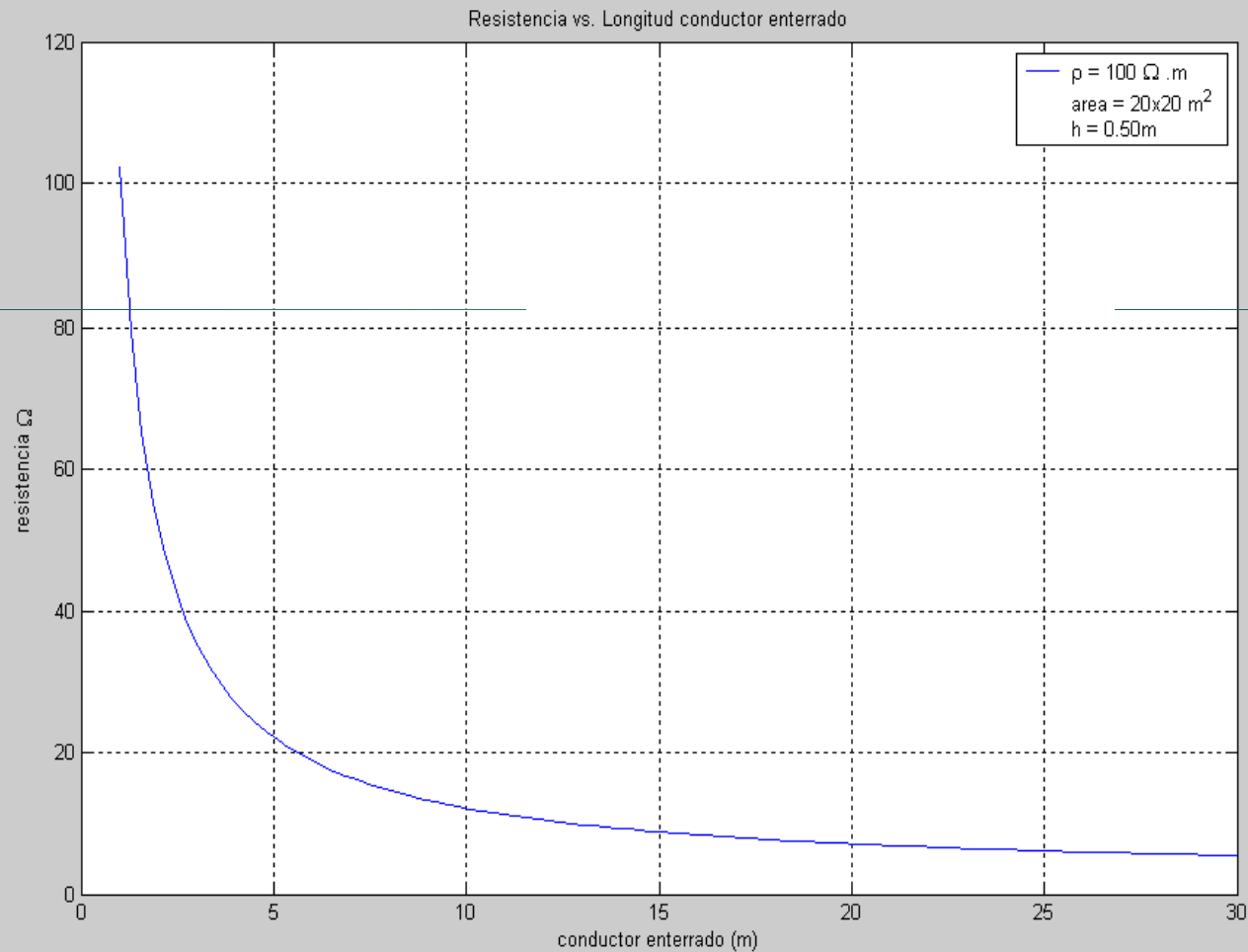
$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

- ▶ 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

41

SUBESTACIONES EN MT



Calculo de resistencia de mallas de tierra

42

- ▶ La resistencia de malla representa la resistencia electrica de la malla hasta el infinito. Su valor debera ser menor que el maximo valor de resistencia que sensibiliza el rele de neutro.

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 35mm² y 120mm².

Mallas de tierra Dimensionado

44

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

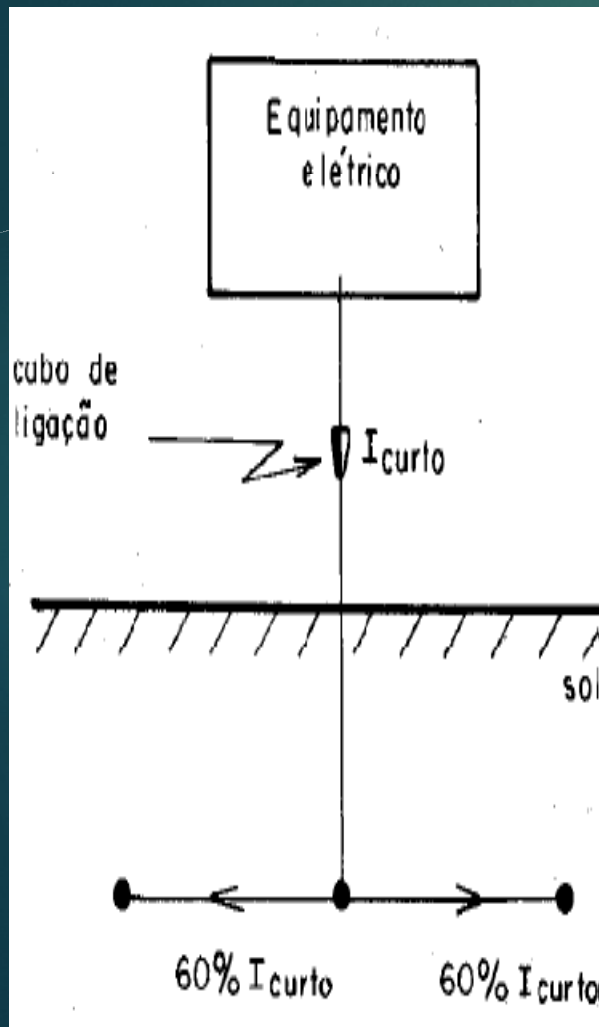
ρ_r = la resistividad del conductor a T_r en $\mu\Omega - \text{cm}$

$K_0 = 1/\alpha_0$

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



- ▶ 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.