ANEXO 1

EJEMPLO DE CALCULO DE RESISTIVIDAD APARENTE

Subestaciones de Media Tensión

Curso 2015

Fernando Berrutti Staino

Planteo del problema

Se realizan mediciones con un telurímetro en el terreno de una instalación a diseñar, de acuerdo al método de Wenner. Las direcciones de medida y dimensiones del terreno donde se realizará el aterramiento se muestran en la figura 1.

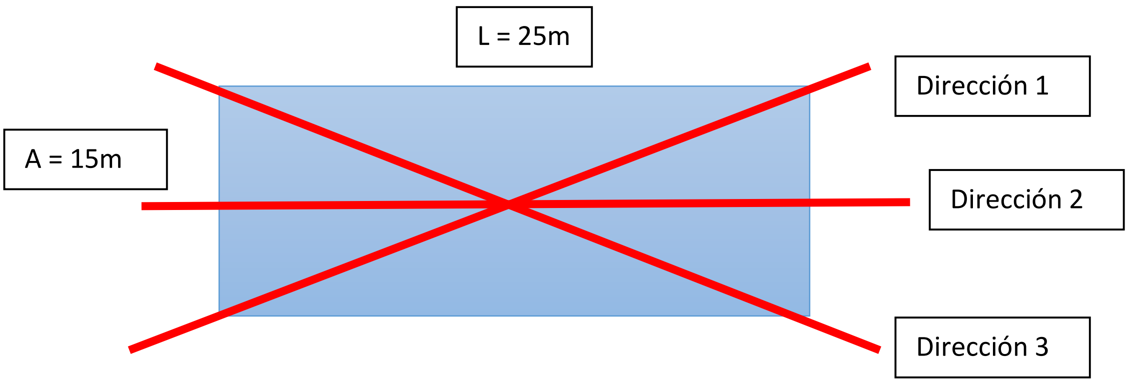

Figura 1: Área de aterramiento

Se mide en tres direcciones, obteniéndose los valores de resistencia de acuerdo a la siguiente tabla 1.

Medida de resistencia (Ω)			
Separación jabalinas (m)	**Dirección 1**	**Dirección 2**	**Dirección 3**
1	15,44	16,71	16,39
4	3,78	3,70	3,90
8	1,79	1,87	1,81
16	0,48	0,51	0,47
24	0,27	0,28	0,27
32	0,19	0,18	0,18

Tabla 1: Medidas de resistencia realizadas en campo

En función de estos datos, determinar la resistividad aparente del suelo, a efectos de su utilización para el diseño de una malla de tierra según el método de la norma IEEE-80.

Resolución del problema

Este problema se resuelve en dos etapas:

1) **Modelado del terreno en capas:** Calcular el perfil de resistividad de terreno en función de la profundidad y llegar a un modelo de dos o más capas horizontales.

2) **Aplicación del método de Endrenyi:** A partir del modelo en capas, determinar un modelo de resistividad aparente representativo de toda el área de aterramiento, utilizando el método de Endrenyi.

Modelado del terreno en capas

A partir de los datos de resistencia de la tabla 1, se puede hallar la resistividad aparente para cada dirección y para cada profundidad, utilizando la expresión $\rho(a) = 2\pi aR$.

Se resumen estos cálculos en la tabla 2.

Cálculo de resistividad (Ω.m)				
Separación jabalinas (m)	**Direccion1**	**Dirección2**	**Dirección3**	**Promedio**
1	97	105	103	**101.7**
4	95	93	98	**95.3**
8	90	94	91	**91.7**
16	48	51	47	**48.7**
24	40	42	41	**41.0**
32	38	37	36	**37.0**

Tabla 2: Cálculo de resistividad aparente

Observar que independientemente de la dirección tomada, para cada renglón que representa una determinada separación entre jabalinas al momento de hacer el ensayo, la dispersión entre los valores de resistividad no es mayor al 5% respecto al promedio de estos valores.

Se puede inferir, por lo tanto, que para cada valor de profundidad en el terreno, la resistividad se mantiene esencialmente en un valor constante.

Esto es importante para concluir que el terreno que se está estudiando puede ser modelado mediante una serie de capas horizontales. Si se registraran valores de resistividad diferentes para una misma profundidad, según la dirección tomada, sería un indicio de estratificación vertical, problema cuya resolución se encuentra por fuera del alcance del curso.

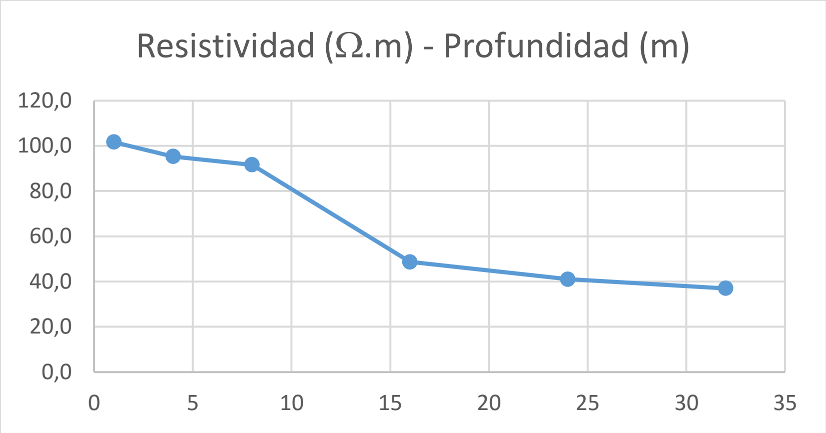

Figura 2: Variación de la resistividad con la profundidad

En la figura 2 se grafican los valores promedio de resistividad en función de la profundidad. La resistividad decrece en forma monótona con la profundidad. Este comportamiento es típico de terrenos estratificados en dos capas horizontales.

Notar lo siguiente:

- A partir de los datos calculados, se puede extrapolar un valor de resistividad correspondiente a una profundidad h = 0m. Este valor corresponderá a la resistividad en la primera capa ρ_1. Efectuando una extrapolación lineal con los primeros el valor de resistividad para h=0 será de 104.7 Ω.m

- Al mismo tiempo, existe claramente un valor asintótico cuando h adquiere valores muy altos. Este valor se tomará como la resistividad de la capa profunda ρ_2, y se puede estimar por inspección como 35 Ω.m.

En un caso real, se deben procesar con rigurosidad los datos de resistividad, y utilizar métodos de ajuste para obtener los valores de ρ_1 y ρ_2, como por ej., mínimos cuadrados.

A partir de la gráfica, es posible observar que entre los 8m y 16m de profundidad, existe una importante disminución de la resistividad. Esto permite inferir que la interfaz entre las dos capas de resistividad se encuentra a una profundidad entre 8m y 16m.

Formalmente, para hallar la profundidad de la primera capa, se debe aplicar la fórmula de Tagg (ver deducción en el teórico):

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

En donde $\rho(h)$ es la resistividad a la profundidad correspondiente a la interfaz entre las dos capas y K es el coeficiente de reflexión: $K=\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1}\approx -0.50$

Con estos valores, se deduce que $\rho(h) = 86.8\ \Omega.m$.

Interpolando en la gráfica de la figura 2, se obtiene que la profundidad de la primera capa es h= 9m.

Por lo tanto el modelo de dos capas del suelo está caracterizado por los siguientes parámetros:

- $\rho_1 = 104.7\Omega.m$
- h = 9m.
- $\rho_2 = 35\Omega.m$.

Aplicación del método de Endrenyi

El método de Endrenyi, reduce el modelo de dos capas a un modelo de resistividad aparente utilizando las curvas paramétricas de la figura 3.

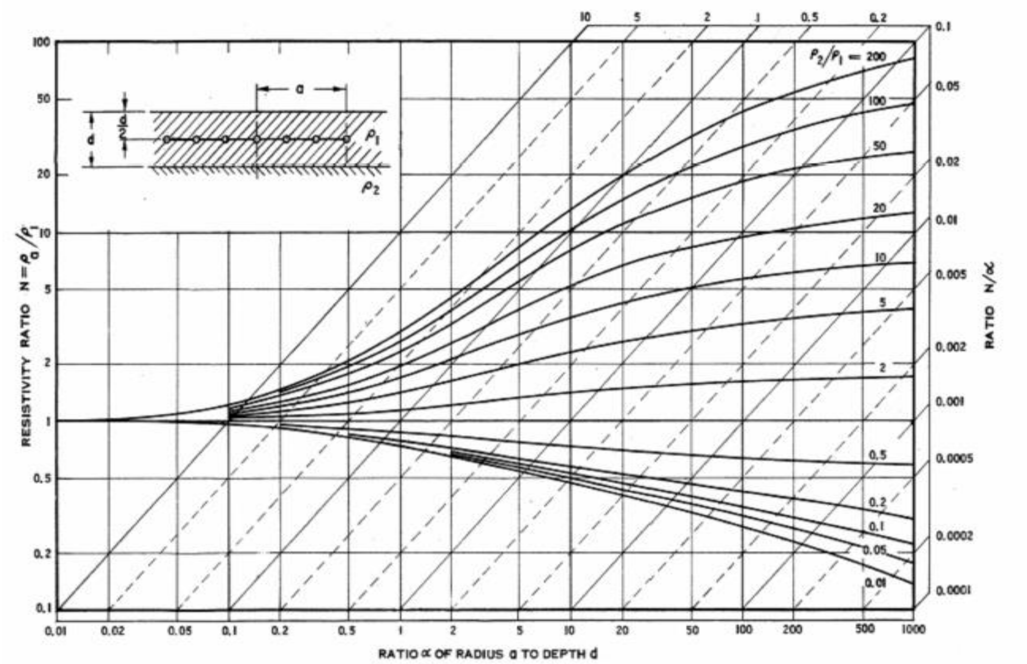

Figura 3: Curvas de Endrenyi

En este método, se deben calcular dos factores adimensionales:

- α: Coeficiente de profundidad
- β: Coeficiente de divergencia.

El coeficiente $\alpha = \dfrac{A}{D \times h}$ en un caso genérico, donde:

- **A:** es el área que ocupa la malla de aterramiento.
- **D:** es la mayor dimensión entre dos puntos de la malla (la diagonal en caso de mallas rectangulares).
- **h:** es la profundidad de la primera capa.

Se aclara que esto es una adaptación respecto al cálculo original de Endrenyi, donde supone que el aterramiento consiste en un anillo de un radio a, inmerso en la primera capa de un suelo estratificado en dos capas.

El coeficiente de profundidad se calcula como: $\beta = \dfrac{\rho_2}{\rho_1}$

Para el caso del ejemplo: $\alpha = \dfrac{375}{29.15 \times 9} = 262$ y $\beta = \dfrac{35}{104.7} \approx 0.333$

A partir de la gráfica, se deduce aproximadamente que N = 0.45 y por lo tanto la resistividad aparente es ρ_{ap} = 0.45 x ρ_1 = 0.45 x 104.7 = 47.1 Ω.m.