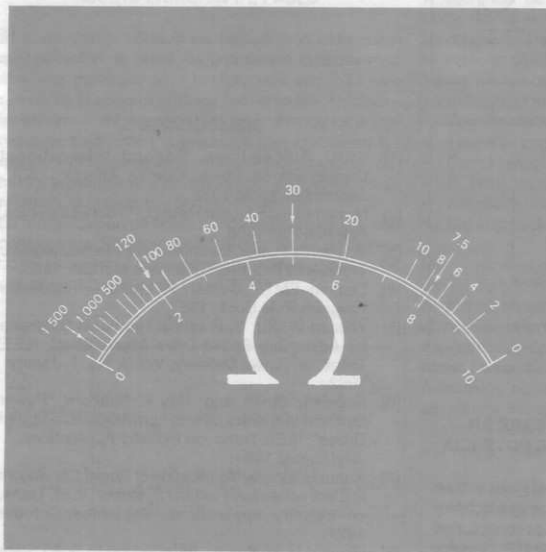


Medición de la resistividad en terrenos no uniformes y de la resistencia de electrodos de tierra



RESUMEN

En este artículo se suministra información sobre los siguientes aspectos:

- Definición del terreno y factores que afectan la resistencia específica del suelo (temperatura, contenido de humedad, compactibilidad, etcétera).
- Resistividad de terrenos no uniformes modelándolos como suelos multicapas estratificados horizontalmente.

Mediante un estudio analítico, y como extensión de los resultados obtenidos para dos capas, se encuentra la expresión general para la resistividad en terrenos de N capas.

Existen programas que desarrollan curvas teóricas o estándar de resistividad Vs espaciamiento de electrodos, cuando los parámetros de entrada han sido profundidades y resistividades de las diferentes capas.

Gracias a los datos obtenidos por el método de Wenner de los cuatro electrodos se hacen curvas de resistividad Vs. espaciamiento de electrodos y se comparan con las gráficas teóricas.

Cuando coincide una curva experimental con una teórica, los parámetros de entrada (resistividades y profundidades de las diversas capas) correspondientes a la curva estándar suministran las características del terreno estudiado.

□ Alvaro Enrique Mondragón
Estudiante
de Ingeniería Eléctrica
Universidad del Valle.

□ Jairo Palomino de la Cruz
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Departamento Electricidad
Universidad del Valle

□ Andrés Rueda
Estudiante
de Ingeniería Eléctrica
Universidad del Valle

□ Jesus Alberto González
Tecnólogo Electricista
Profesor Asistente
Departamento Electricidad
Universidad del Valle

1. INTRODUCCION

Gran parte de los terrenos existentes tienen marcadas características de no uniformidad, razón por la cual se desarrolló un método analítico-experimental, con el fin de encontrar un modelo acorde a las características de heterogeneidad del suelo. Se asume una estratificación horizontal de N capas, se utiliza corriente D.C y uso del método de Wenner de las cuatro electrodos para la obtención de los datos experimentales.

Conocer el valor de la resistividad de los terrenos es de vital importancia en un sinnúmero de aplicaciones en el campo de la ingeniería eléctrica, por ejemplo para el diseño de sistemas de tierra, que tiene por objeto prevenir interrupciones en el servicio eléctrico, protección de inmuebles y protección de la vida humana y/o animal, contra descargas atmosféricas y para desviar a tierra las corrientes de corto circuito.

Si las protecciones no están diseñadas para las corrientes y voltajes de falla pueden sufrir averías. En el caso de que la falla no sea balanceada, la malla de tierra debe asumir las corrientes de secuencia cero y evitar los daños que éstas pueden ocasionar al sistema.

La magnitud de la corriente de secuencia cero depende del valor de la resistencia del terreno.

La medición adecuada de la resistividad de los terrenos tiene importantes aplicaciones en el campo de la prospección geoelectrónica, entre las cuales se destacan:

- Investigaciones tectónicas para la búsqueda de petróleo.
- Estudios para la localización de aguas subterráneas.
- Estudios de cuencas carboníferas.
- Localización aproximada de materiales de construcción.
- Localización de yacimientos de minerales útiles, etcétera.

En el campo de la medicina se pueden realizar sondeos eléctricos

(con campos eléctricos muy débiles), para obtener una imagen tridimensional de diferentes zonas del cuerpo.

En conclusión, la medición de resistividades en terrenos tiene variadísimas e importantes aplicaciones y es por esto que se hace necesario la medición adecuada de las mismas, a fin de no incurrir en peligrosos y costosos errores.

2. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

2.1. Definición de la resistividad del terreno.

La resistividad del terreno (ρ) se define como la resistencia existente entre las caras opuestas de un cubo de dimensiones unitarias. Cuando la arista del cubo es un metro, la unidad de resistividad es el ohmio-metro ($\Omega\cdot m$), reconocido universalmente por el Sistema Internacional (S.I.).

Se concluye que la resistividad representa la resistencia de un conductor de 1 m^2 de sección por 1 m de longitud.

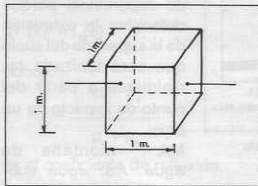


Fig. 1. Concepto de resistividad o resistencia específica del terreno

2.2 Factores que afectan la resistividad del suelo

En términos generales las capas terrestres presentan muy poca homogeneidad. La resistividad es muy variable, depende de factores aleatorios, razón por la cual la resistencia específica se debe determinar por mediciones directas según las condiciones presentes en cada caso.

Las características más relevantes

que afectan la resistividad del terreno son:

- a. Tipo de suelo (composición del terreno).
- b. Concentración y composición de las sales disueltas. La mayor parte de los componentes del suelo son aislantes; la conducción eléctrica se presenta gracias a la presencia de las sales metálicas que al mezclarse con el agua forman un electrolito.
- c. Contenido de humedad. Esta es una variable importante por sí mismo y porque disuelve las diferentes sales presentes en algunos terrenos. Al aumentar la humedad del terreno, disminuye su resistividad. La cantidad de humedad es variable y depende de diversos factores tales como clima, estación del año, naturaleza del subsuelo, etc. Rara vez el terreno es seco, la humedad aumenta con la profundidad. Las mediciones de resistividad deben hacerse en las peores condiciones, es decir, cuando el contenido de humedad del terreno es mínimo. El agua congelada tiene características distintas al agua en estado natural. Suelos congelados y hielo tienen una resistencia alta comparativamente.
- d. Temperatura. La resistividad del terreno aumenta a medida que la temperatura disminuye.
- e. Tamaño o textura del grano.
- f. Compactibilidad.

Por lo general el terreno se puede considerar como un mal conductor de la electricidad, ya que la mayor parte de sus constituyentes (óxido de aluminio, carbonato de cálcico, etcétera) tienen en estado seco resistividades muy grandes (del orden de las resistividades de los materiales aislantes). Un hecho importante es que la resistencia específica disminuye rápidamente con el contenido de sales disueltas y con el grado de humedad del terreno.

La composición del terreno es heterogénea, varía por capas que poseen características muy diferentes lo que puede conducir a errores fatales cuando se hacen consideraciones de uniformidad del suelo.

Los medios urbanos e industriales contribuyen con otros factores que afectan la resistividad, como: gran cantidad de elementos conductores enterrados utilizados para las canalizaciones de toda índole (de agua, de gas, eléctrica, etc.) que constituyen un fácil camino para

Los depósitos de minerales o grafitos pueden presentar una buena conductividad, pero en ciertos casos aparecen problemas en transmisiones y recepciones de alta frecuencia. Por esta razón es conveniente conocer otras características físicas del suelo, como la permeabilidad (μ) y la constante dieléctrica (ϵ), que están expresados como números relativos, sin unidad.

La relación que liga la constante dieléctrica (ϵ) y la conductividad (σ) es:

$$\epsilon \approx 50\sigma^{1/5} \quad (\sigma \text{ en mhos por metro } \Omega^{-1}/\text{m})$$

Al incluir como variable la humedad, la constante dieléctrica debe ser modificada por el siguiente factor:

$$2.5 \times 0.78 \times \text{contenido de agua (\%)}$$

La mayor parte de las rocas minerales puras tienen una alta resistividad de 10^5 a $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ y una constante dieléctrica de 2 a 3.

La rigidez dieléctrica es de importancia porque determina la extensión de la superficie del suelo que será ionizada radialmente a partir del punto de impacto de un rayo.

MA: montaña de agua. AS: agua sub-

terránea.

AM: agua de mar. A: arcillas.
B: barro, greda, arcilla arenosa.

TABLA 1.
Resistividad promedio de diversos terrenos

Tipo de terreno	Resistividad en ohmios-metro
Suelo orgánico húmedo	10
Suelo húmedo	10^2
Suelo seco	10^3
Yacimiento de rocas	10^4

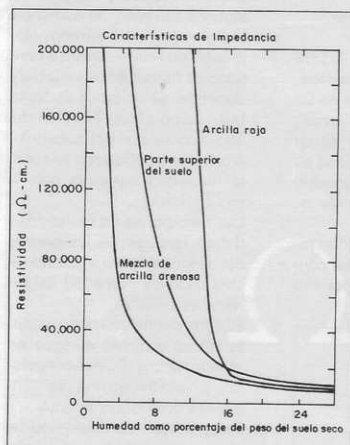


Fig. 2. Variación de la resistividad del suelo debido al contenido de humedad

las corrientes de tierra y pueden dar origen a tensiones indeseables en los electrodos de tierra.

El contenido de agua en la tierra puede presentar variaciones desde el 5% bajo condiciones de sequedad hasta el 40% después de lluvia. Valores comunes oscilan entre el 10% y 30%. En la Figura 2 se ven los efectos del contenido de humedad sobre la resistividad de tres tipos de suelos diferentes. Cuando la humedad alcanza el 20% aproximadamente, las resistividades de los tres suelos tienden al mismo valor.

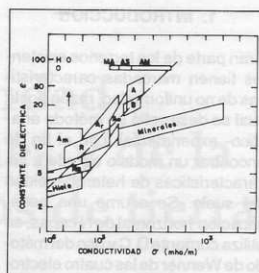


Fig. 3. Conductividad y constantes dieléctricas relativas para diversos tipos de suelo y agua

Aa: arenas, gravas, piedra arenisca, yeso, piedra caliza.
Ar: arena arcillosa. Am: aceite mineral.

R: rocas cristalinas. Rs: rocas salinas, anhidrita.

La ϵ del hielo es $2\epsilon_0$ y la del agua-sal $80\epsilon_0$ donde ϵ_0 es la constante dieléctrica del aire. ϵ varía de 1 a 80.

3. MEDICION DE LA RESISTIVIDAD EN TERRENOS NO UNIFORMES

Separte de la siguiente suposición: la tierra es una estructura multicapa estratificada horizontalmente, lo cual quiere decir que el subsuelo se compone de varias zonas, dentro de cada una de las cuales la resistividad es constante, separadas entre sí por superficies perfectamente planas.

Para encontrar los resultados analíticos referentes a una estructura de tierra de N capas estratificadas horizontalmente, se parte del caso particular de dos capas para posteriormente hacer la extensión a cualquier número de ellas.

3.1 Estructura de tierra de dos capas estratificadas horizontalmente.

Para hallar el potencial en cualquier punto de cada capa se parte de la ecuación de Laplace:

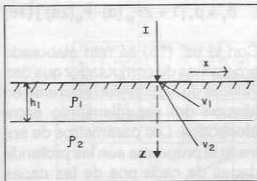


Fig. 4. Modelo de tierra de dos capas.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1)$$

La anterior ecuación se resuelve en coordenadas cilíndricas (por consideraciones de simetría). Para cada capa se obtiene:

$$\begin{cases} V^2 = V_0 + V_1 \\ V^2 = V_0 + V_2 \end{cases} \quad (2)$$

Donde V_0 es el potencial para una tierra homogénea de resistividad p_1 , y puede ser expresada así:

$$V_0 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (3)$$

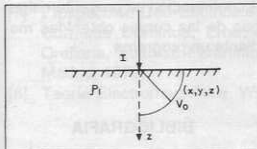


Fig. 5.

p_1 es la resistividad y $J_0(\lambda x)$ es la función de Bessel de primer orden y especie cero; Z se considera positiva medida hacia el interior de la tierra. V_1 y V_2 son términos que expresan la influencia de la segunda capa.

$$V_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [f_1(\lambda) e^{-\lambda z} + g_1(\lambda) e^{-\lambda z}] J_0(\lambda x) d\lambda \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [f_2(\lambda) e^{-\lambda z} + g_2(\lambda) e^{-\lambda z}] J_0(\lambda x) d\lambda \quad (5)$$

Sustituyendo (3), (4) y (5) en (2) se obtiene:

$$V_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [1 + f_1(\lambda)] + g_1(\lambda) e^{-\lambda z} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [1 + f_2(\lambda)] + g_2(\lambda) e^{-\lambda z} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (7)$$

$f(\lambda)$ y $g(\lambda)$ se determinan gracias a las siguientes condiciones de frontera:

- a) cuando $z \rightarrow \infty$, $V_z \rightarrow 0$
- b) cuando $z = 0$, $\partial V / \partial z = 0$
- c) cuando $z = h_1$, $V_1 = V_2$
- d) cuando $z = h_1$, $(1/\rho_1)(\partial V_1 / \partial z) = (1/\rho_2)(\partial V_2 / \partial z)$

Finalmente se obtiene:

$$f_1(\lambda) = \frac{K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}}$$

$$g_1(\lambda) = f_1(\lambda)$$

donde:

$$K_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

es el coeficiente de reflexión.

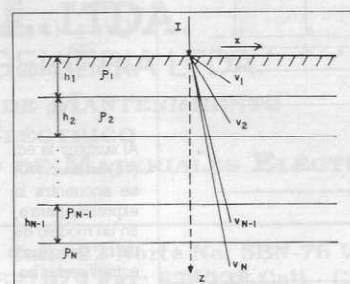


Fig. 6. Modelo de tierra de N. capas.

Sustituyendo las expresiones de $g_1(\lambda)$ y $f_1(\lambda)$ en la ecuación (6), se puede representar el potencial en la superficie terrestre ($z=0$) por:

$$V_x = \frac{\rho_1 I}{2\pi} [1 + F_2(x)] \quad (8)$$

donde

$$F_2(x) = 2x \int_0^\infty \frac{K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda$$

3.2. Estructura de tierra de N capas estratificadas horizontalmente

El proceso utilizado para dos capas puede hacerse extensivo a N capas, hallando las expresiones para N potenciales ($V_1, V_2, \dots, V_N$) y aplicando convenientemente las condiciones de frontera. (Ver Figura 6)

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_N(x)] \quad (9)$$

donde:

$$F_N(x) = 2x \int_0^\infty \frac{K_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda$$

$$\begin{aligned} K_{N1} &= \frac{K_1 + K_{N2} e^{-2\lambda h_2}}{1 + K_1 K_{N2} e^{-2\lambda h_2}} \\ K_{N2} &= \frac{K_2 + K_{N3} e^{-2\lambda h_3}}{1 + K_2 K_{N3} e^{-2\lambda h_3}} \\ \dots K_{NS} &= \frac{K_s + K_{N_{S+1}} e^{-2\lambda h_{s+1}}}{1 + K_s K_{N_{S+1}} e^{-2\lambda h_{s+1}}} \\ K_{NN-2} &= \frac{K_{N-2} + K_{NN-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}{1 + K_{N-2} K_{NN-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}} \\ K_{NN-1} &= K_{N-1} \end{aligned}$$

Además

$$K_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \dots K_s = \frac{\rho_{s+1} - \rho_s}{\rho_{s+1} + \rho_s}$$

$$K_{N-1} = \frac{\rho_N - \rho_{N-1}}{\rho_N + \rho_{N-1}}$$

3.3 Configuración tetraelectrónica de Wenner

Este es el método para medición de resistividades más utilizado. (Ver Figura 7).

La distancia entre dos electrodos consecutivos es a , la corriente I fluye hacia la tierra mediante la aplicación de potencia entre los electrodos C_1 y C_2 . Entre p_1 y p_2 aparece una diferencia de potencial V ; la resistividad aparente (resistividad esperada acorde al modelo de tierra estratificado horizontalmente) ρ_a puede ser expresada así:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (10)$$

Los electrodos pueden ser considerados tales que el potencial es debido a la corriente I desde el

electrodo 1 y a la corriente $-I$ desde el electrodo 4 consideradas independientemente. Asumiendo una tierra de N capas los potenciales pueden ser calculados usando la ecuación (9). Para el electrodo 2, si se indica el potencial debido al electrodo 1 (I) como V_{21} , y el debido al electrodo 4 ($-I$) como V_{24} , se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{21} = V_N(a) = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + F_N(a)] \quad (11)$$

$$V_{24} = V_N(2a) = \frac{\rho_1 (-I)}{2\pi a} [1 + F_N(2a)] \quad (12)$$

Para el electrodo 3

$$V_{31} = V_N(2a) = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + F_N(2a)] \quad (13)$$

$$V_{34} = V_N(a) = \frac{\rho_1 (-I)}{2\pi a} [1 + F_N(a)] \quad (14)$$

La diferencia de potencial entre los electrodos 2 y 3 es:

$$V_N = V_2 - V_3 = (V_{21} + V_{24}) - (V_{31} + V_{34})$$

$$V_N = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + F_N(a) - F_N(2a)] \quad (15)$$

Al sustituir la ec. (15) en la ec. (10) se encuentra la expresión para ρ_a en un modelo de tierra de capas estratificadas horizontalmente.

$$\rho_a = \rho_1 [1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] \quad (16)$$

Con la ec. (16) se han elaborado programas de computador que dan valores de resistividad aparente en función del espaciamiento entre electrodos. Los parámetros de entrada al programa son las profundidades de cada una de las capas ($h_1, h_2, \dots, h_N$) y las resistividades ($\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$). Finalmente se obtienen curvas de ρ_a vs a , a las cuales se les denomina curvas standard o teóricas.

Ahora, con la ecuación (10) y los datos obtenidos mediante el método de Wenner de los cuatro electrodos, se gráfica ρ_a vs. a en papel logarítmico-logarítmico. A estas curvas se les denomina experimentales.

El último paso consiste en comparar la curva experimental con curvas estándar, si coinciden los parámetros de la curva teórica profundidades y resistividades corresponden al terreno estudiado.

A continuación se presentan algunas de las curvas obtenidas mediante un programa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Medidas Eléctricas", Enciclopedia CEAC de la Electricidad, 1ª Edición, marzo 1984, Barcelona-España.
- [2] Física de Suelos, L. D. Bayer, Walter H. Gardner, Wilfrad R. Gardner, Editorial U.T.E.H.A.
- [3] Enciclopedia Ilustrada Cumbre, Editorial Cumbre, Tomos I, VI, VII, XI, XII, XIII.
- [4] Diccionario de la Lengua Española, Real Academia Española, Editorial Espasa-Calpe S.A.
- [5] "Modelling of a Grounding Electrode", D. Mukhedkar, Y. Gervais, J. P. DeJean, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Enero 1973.

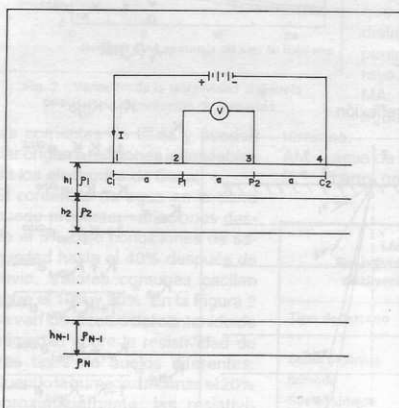


Fig. 7. Configuración de Wenner en un terreno de 4 capas.

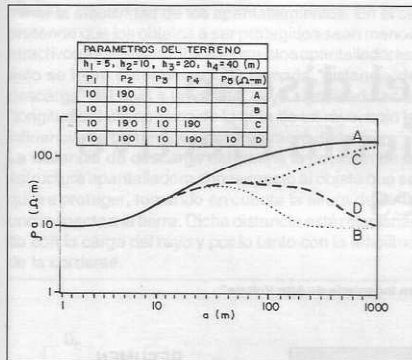


Fig. 8. Resistividad aparente para $k = +0.9$

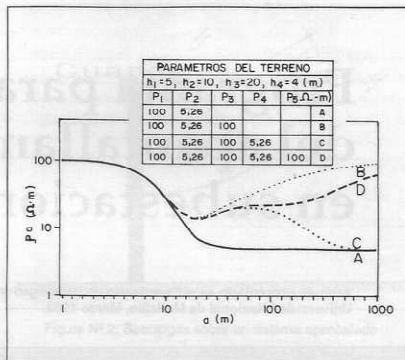


Fig. 9. Resistividad aparente para $k = -0.9$

- [6] "Ground Electrode Resistance Measurements in Non-Uniform Soils, Farid Dawalibi", Dinkar Mukhedkar, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93 No 1, Enero 1974.
- [7] Prospección Geo-eléctrica en Corriente Continua, Ernesto Orellana, Editorial Paraninfo, Madrid, 1972.
- [8] Teoría Electromagnética, William H. Hayt Jr., Editorial McGraw-Hill, 1980.
- [9] Cálculo con Geometría Analítica, Louis Leithold, Editorial Harla S.A. segunda edición, 1973.
- [10] "Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No 2, abril 1990.
- [11] "Resistance Measurement of Large Grounding Systems", Farid Dawalibi, Dinkar Mukhedkar, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 98, No 6 Nov./ Dic. 1979.
- [12] "Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Test", C. J. Blattner, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS. 101. No 8 Agosto 1982

D.I.LTDA.

DIMEL INGENIERIA LTDA.

○ INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO
Y DISEÑO ELÉCTRICO

○ SUMINISTRO DE MATERIALES ELÉCTRICOS

Calle 22 Norte No. 5BN-76 Versalles
Tels: 675228 - 671979 Fax: 675228 Cali - Colombia

65