

INFORME DE BECA

Becario:	Rebak Eduardo Isaac
Director:	MSc. Ing. Corina María
Co-director:	---
Unidad Académica:	Facultad de Ingeniería. UNaM
Área temática:	Ingenierías y Tecnologías
Código del Proyecto/Trabajo	16/I146-PI
Acreditado:	SI
Tipo de Beca – Duración:	BECA EICYT 2020
Título del Plan de Trabajo:	<i>Caracterización de las puestas a tierra y las protecciones contra descargas atmosféricas.</i>

1. *Exposición sintética de la labor desarrollada*

Se realizó la búsqueda bibliográfica y estado del arte

La verificación de la capacidad de la tierra para conducir corriente se le atribuye a Le Monnier, Watson, Franklin, and De Luc [1-2].

En 1880 Edison patenta en Estados Unidos el primer sistema de distribución eléctrica de corriente continua que utilizaba el sistema enterrado de tubería de gas como retorno, el cual quizás pueda ser considerado cómo el primer electrodo de puesta a tierra.

Al comienzo de la generación eléctrica trifásica los sistemas no estaban sólidamente conectados a tierra, Elihu Thomson fue el primero en introducir esta práctica pero no había un consenso generalizado respecto a la conexión a tierra del neutro del transformador [4].

A principios del siglo XX Wenner publica un método para determinar el perfil de resistividades del suelo realizando una formulación analítica en el marco de las hipótesis de suelo perfectamente homogéneo y de dimensiones infinitas, sondas de medición consideradas puntuales, inexistencia de perturbaciones e irregularidades y distribución uniforme del campo electromagnético. Este método hasta el día de hoy es utilizado [5].

Tagg utiliza el método de Wenner para el cálculo de la resistencia de tierra e introduce el coeficiente de reflexión a fin de considerar un suelo estratificado en dos capas [6]. Smith-Rose realiza estudios de las propiedades eléctricas del suelo frente a un amplio espectro de frecuencias utilizando muestras de diferentes tipos de suelo [7].

Bewley al no estar de acuerdo con las teorías propuestas hasta el momento acerca del comportamiento transitorio de los electrodos de puesta a tierra, ya que consideraba que contradecían los mecanismos físicos o no dimensionaban adecuadamente los fenómenos involucrados, por lo que realizó estudios experimentales sobre un contrapeso a fin de corroborar sus estudios analíticos. Determinó que el comportamiento de una corriente impulsiva inyectada en el suelo es gobernado en un inicio por la capacitancia del suelo con su impedancia característica y con el transcurso del tiempo da a lugar la aparición de una impedancia de fuga debido a la prevalencia de los efectos conductivos [8], [9].

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra considerando varios tipos de electrodos, Sunde partió de la teoría del campo electromagnético formulada por Maxwell y estudió el comportamiento de las puestas a tierra – PaT – frente a corrientes impulsivas utilizando el modelo del telegrafista, cuyos parámetros por unidad de longitud varían con la frecuencia [10]–[14].

Numerosos autores ponen en evidencia la diferencia entre comportamiento de las PaT según se trate en estado estacionario o transitorio [15]–[19], pero los modelos propuestos hasta este momento son aproximados y aplicados a configuraciones simples de PaT.

2. *Objetivos alcanzados*

Objetivo General

- Estudiar los modelos de suelo no homogéneo y la variación de sus parámetros para realizar mejoras al diseño de los sistemas de puesta a tierra.

Estaba previsto realizar un modelo a escala a fin de estudiar la variación de los parámetros eléctricos del suelo con el contenido de sales y de humedad, además de las mediciones en el terreno a fin de determinar el valor de la resistencia específica de los mismos.

No se pudieron concretar estos objetivos.

Métodos y técnicas empleados

Las puestas a tierra (PaT) cumplen un rol muy importante en los sistemas eléctricos porque garantizan la seguridad, tanto de las personas como del equipamiento que se halla conectado a las mismas.

La finalidad de PaT es dispersar a tierra las corrientes de falla producidas por sobretensiones originadas por una falla o maniobras del sistema eléctrico o por tensiones inducidas debido a la caída de un rayo.

El suelo bajo la superficie terrestre no es homogéneo por lo tanto el cálculo de la distribución de las corrientes en el mismo se hace muy dificultoso. Hay que tener en cuenta, además, las variaciones estocásticas que producen cambios en la conductividad del suelo.

La conductividad del suelo es uno de los factores principales que condicionan las distribuciones de corriente, y es fundamental en el cálculo de la impedancia de PaT.

Con este trabajo se pretende incluir en los estudios de las PaT, la variación de los parámetros del suelo en función del contenido de humedad y temperatura o frente a ondas impulsivas de altas frecuencias, con el fin de poseer un conocimiento preciso de los factores que afectan su comportamiento, ya que ello es fundamental para un adecuado dimensionamiento de las PaT y cerciorarse que las mismas cumplan rol fundamental, que es asegurar la vida de las personas, animales y equipamientos eléctricos. Debido a que los suelos son heterogéneos, es apropiado hablar de resistividad aparente.

Medición de la resistividad aparente método de los cuatro electrodos

La resistividad se puede definir como la resistencia entre dos lados opuestos de un cubo de un metro de longitud. El valor de la resistividad varía con la cantidad de humedad, granulometría, temperatura, sales disueltas y profundidad por lo que su conocimiento exhaustivo se hace imprescindible. Cuando se realiza una instalación de puesta a tierra en necesario realizar un análisis prospectivo del suelo y determinar un perfil de resistividades. Desafortunadamente en la práctica esta tarea no es tan sencilla de llevar a cabo por las particularidades del suelo mencionadas anteriormente. Se puede establecer con un cierto grado de certeza realizando mediciones en puntos específicos y luego por medio de técnicas de aproximación poseer un acabado conocimiento de la estructura del suelo.

Según la norma IRAM 2281-2 [20] las mediciones deben cubrir toda el área que va a proteger la malla o el electro de PT y el número de mediciones a realizar va a depender de las dimensiones del terreno. La norma recomienda un mínimo de 5 puntos de medición para terrenos de hasta 10.000 m² y realizar las mediciones en sentidos ortogonales.

La mayoría de los métodos clásicos utilizados por los geólogos para medir e interpretar la resistividad de la tierra son complejos. Sin embargo, los objetivos de quien diseña sistemas de energía eléctrica son bastante diferentes de los de un geólogo. La exploración eléctrica de la tierra con fines geofísicos apunta a

la determinación de la estructura y composición del suelo a grandes profundidades. Por el contrario, en ingeniería, se necesita conocer la estructura del suelo a profundidades relativamente bajas y en distancias comparativamente cortas, porque el buen funcionamiento de las instalaciones de puesta a tierra está influenciado principalmente por las características del suelo que rodea al electrodo de puesta a tierra.

Técnicas para la medición de la resistividad específica del suelo

Para la medición de la resistividad específica del suelo mediante prospección eléctrica, usualmente se emplean cuatro electrodos, dos electros donde se inyecta corriente en el suelo, llamados comúnmente electrodos de corriente, y se mide la diferencia de potencial a través de dos electrodos de voltaje. Dependiendo de la geometría del método utilizado en la medición, se calcula el valor de la resistividad específica aparente del suelo en ohmios – metros.

Gish y Rooney estudiaron y midieron una gran variedad de suelos y concluyeron que las medida de resistividad aparente es la que corresponde al suelo que se halla a una profundidad aproximadamente igual al espaciado de los electrodos [21].

Las diferencias en las diversas técnicas empleadas para el registro de la resistividad aparente radican en la disposición y ubicación de los electrodos. Uno de los métodos mas difundidos, en ingeniería eléctrica para le medición de la resistividad aparente es el método de Wenner [22], esta disposición posee una mayor sensibilidad para detectar los cambios verticales en la resistividad, siendo más apropiado para estudiar estructuras horizontales y tiene mayor fortaleza de la señal en comparación con otros métodos empleados. consiste en introducir en la tierra cuatro electrodos dispuestos sobre una línea recta y distantes uno de otro a una misma distancia. La función de estos electrodos es inyectar corriente en el suelo o medir el potencial causado por el flujo de corriente eléctrica a través de otros electrodos, este es un método de resistividad galvánica. Tradicionalmente se considera un método no convencional porque las mediciones implican un volumen muy pequeño de suelo en las proximidades de los electrodos, y sólo se registran los cambios locales en los valores de resistividad, obteniéndose un sondeo de la estructura vertical de la tierra.

Se han introducido variaciones para eliminar o disminuir ciertas dificultades encontradas con la disposición Wenner, particularmente en grandes espacios entre electrodos. La dificultad se debe a diferencias de potencial muy bajas que se desarrollan entre las sondas de potencial en grandes separaciones de electrodos. Dado que los estudios de resistividad para aplicaciones de ingeniería eléctrica requieren solo espaciamientos moderados, el método Wenner es más ampliamente utilizado, en gran medida, por su simplicidad y precisión. Sin embargo, es esencial que se utilice la instrumentación adecuada para mitigar el efecto de las corrientes vagabundas en la tierra.

Se inyecta una corriente I en la tierra a través de dos electrodos externos ($C1$ y $C2$) y la diferencia de potencial V de la superficie de la tierra se mide mediante los dos electrodos internos ($P1$ y $P2$) como de muestra en la Figura 1. Los electrodos externos se denominan electrodos de corriente y el par interno, electrodos de potencial.

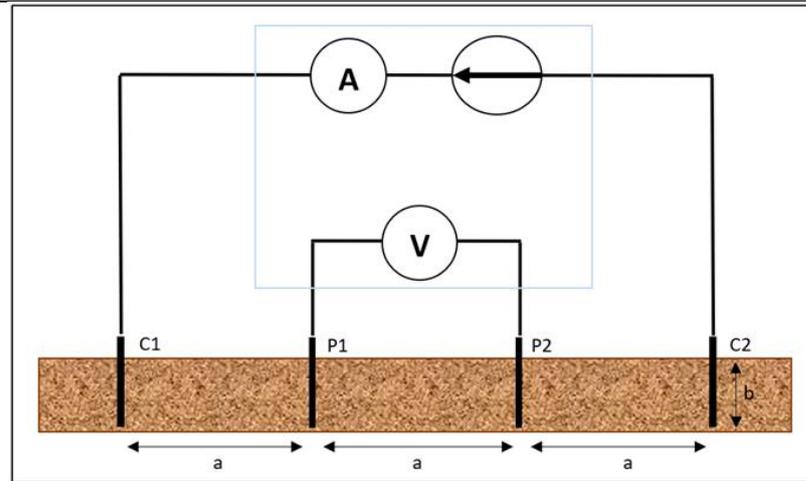


Figura 1: Configuración por el método de Wenner

La corriente utilizada para la medición de ρ debe ser alterna, o bien corriente continua periódicamente invertida para evitar posibles efectos de polarización electroquímica. La frecuencia de esta corriente no debe coincidir con la frecuencia industrial ni sus respectivas armónicas.

El Método de Wenner utiliza para su análisis una carga puntual enterrada considera un suelo heterogéneo e isotrópico, que inyecta una corriente en el suelo y regresa a la fuente de energía a través de un electrodo de retorno lo suficientemente alejado de la fuente de corriente puntual para que se puedan despreciar sus efectos, por lo que el electrodo de retorno se puede considerar como una tierra remota.

Por la ley de Ohm tenemos que:

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J} \quad [1]$$

Siendo \vec{E} (V/m), el campo eléctrico, ρ ($\Omega\text{-m}$) y \vec{J} (A/m²) la densidad de corriente. Dado que se supone que no hay involucradas otras fuentes de corrientes $\Delta\vec{J}$ es igual a cero.

Aplicando diferenciales en [xxx.1] tenemos que:

$$\Delta\vec{E} = \rho \cdot \Delta\vec{J} \quad [2]$$

$$\vec{E}_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad \vec{E}_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad \vec{E}_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad [3]$$

Donde V es el gradiente de potencial, reemplazando en [3] en [2] tenemos

$$\Delta\vec{J} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right] = 0 \quad [4]$$

Siendo las ecuaciones entre corchetes de [4] la ecuación de Laplace. En coordenadas esféricas se tiene:

$$\Delta\vec{J} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right] = 0 \quad [5]$$

Dado que se considera un sistema simétrico, las derivas respecto de θ y φ son igual a cero por lo que [5] se reduce a:

$$\Delta\vec{J} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad [6]$$

Considerando un electrodo semiesférico concéntrico con la fuente de corriente I la solución de 6 [5]

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [7]$$

La diferencia de potencial ΔV medida por los electrodos P1 y P2 de la figura 2 y teniendo en cuenta [7] la resistividad aparente puede calcularse como [6]

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad [8]$$

Donde K es un coeficiente geométrico que depende del método de medida utilizado.

Electrodes array		K	
2D	Wenner		$2\pi a$
	Wenner-Schlumberger		$\pi n(n+1)a$
	Dipole-Dipole		$\pi n(n+1)(n+2)a$
	Pole-Pole		$2\pi a$
	Pole-Dipole Forward		$2\pi n(n+1)a$
	Reversed		
3D	Square		$\frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}}$

Figura 2: Coeficiente geométrico según el método [18]

Si el suelo se considera uniforme la resistividad aparente medida es independiente de la separación entre electrodos. En caso de suelos no homogéneos la profundidad de penetración de la corriente en la tierra y por lo tanto la constitución del suelo que halla la corriente cambia con el espaciado de los electrodos.

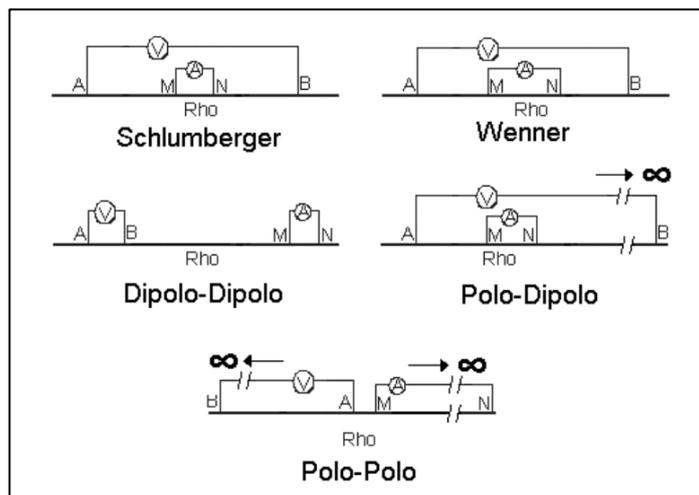


Figura 3: Configuración de los electrodos de medición según los distintos métodos

Estructura del suelo

Debido a que los suelos no son homogéneos existirán variaciones en la resistividad de los mismos, esto dependerá de la ubicación geográfica y de los efectos climáticos. A distintas profundidades tendremos en un mismo tipo de suelo variaciones en su resistividad por la variación del nivel freático y la compactación. Entre los factores que influyen en la resistividad tenemos:

- Tipo de suelo
- Mezcla de diversos tipos de suelo
- Contenido de humedad
- Temperatura
- Compactación
- Composición química y concentración de sales disueltas.

La temperatura la humedad y la concentración de sales disueltas son factores variables en un sistema de puesta a tierra, la variación se puede apreciar en las gráficas siguientes.

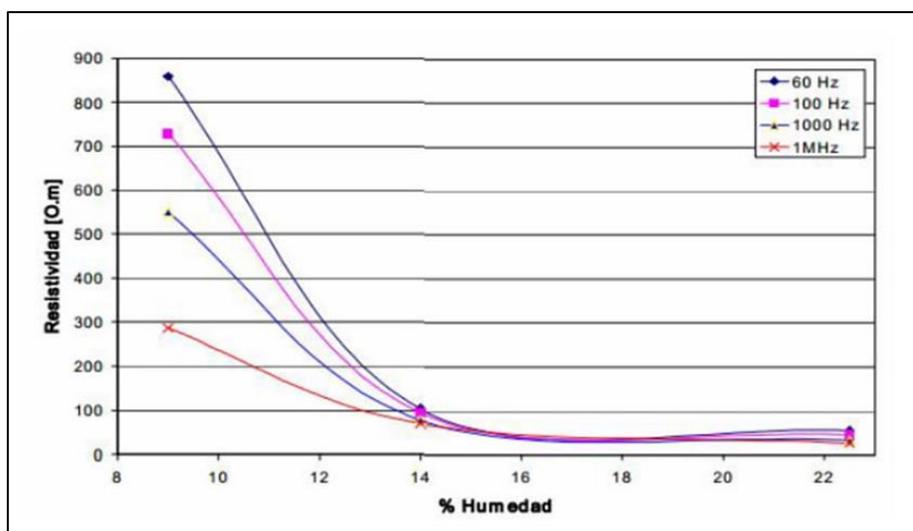


Figura 4: Variación de la resistividad respecto a la humedad y a distintas frecuencias

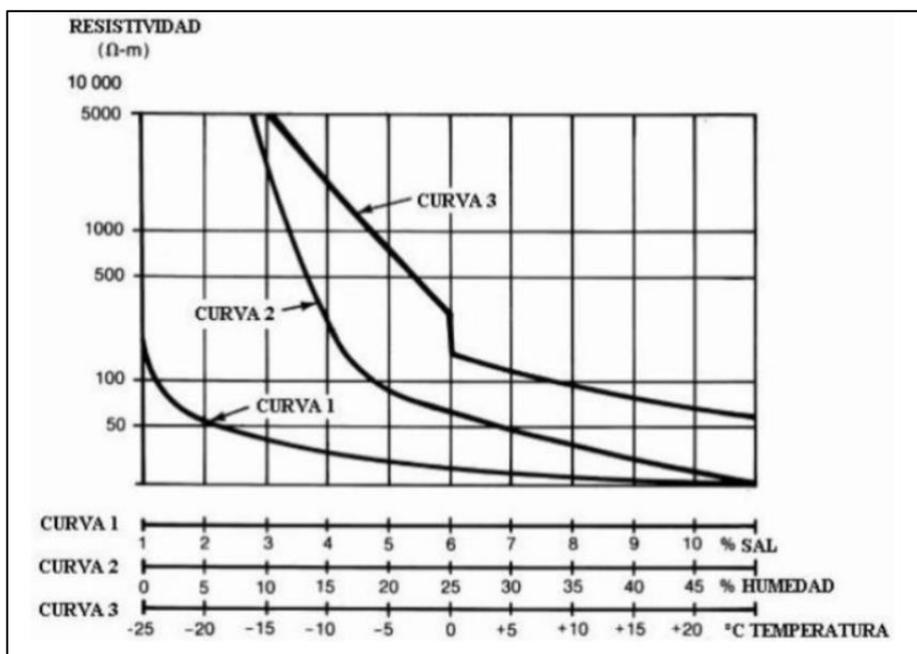


Figura 5: Variación de la resistividad respecto a la sal, humedad y temperatura

3. Bibliografía

- [1] T. Lockwood, Earth Wires; or, The Earth as an Electric Circuit Completer, Trans. Am. Inst. Electr. Eng., vol. 1, n.o 1, pp. 75-84, 1884.
- [2] I. Cohen, The Two Hundredth Anniversary of Benjamin Franklin 's Two Lightning Experiments and the Introduction of the Lightning Rod, Proc. Am. Philos. Soc., vol. 96, n.o 3, pp. 331-366, 1952.
- [3] D. W. Zipse, L. Fellow, y E. Forensics, History of grounding / Earthing practices in the united states, pp. 231-244, 2017.
- [4] H. Dewey, General considerations in grounding the neutral of power systems, IEEE J. Am. Inst. Electr. Eng., vol. 42, n.o 6, pp. 589-600, 1923.
- [5] F. Wenner, A method of measuring earth resistivity, Bull. Bur. Stand., vol. 12, pp. 469-478, 1916.
- [6] G. Tagg, Practical investigations of the earth resistivity method of geophysical surveying, Proc. Phys. Soc., vol. 43, n.o 3, pp. 305-323, 1931.
- [7] R. Smith-Rose, Electrical measurements on soil with alternating currents, J. Inst. Electr. Eng., vol. 75, n.o 452, pp. 221-237, 1933.
- [8] B. Bewley, Theory and Tests of the Counterpoise, Electr. Eng., vol. 53, n.o 8, pp. 1163-1172, 1934.
- [9] B. Bewley, Traveling Waves Due to Lightning, Trans. Am. Inst. Electr. Eng., vol. 48, n.o 3, pp. 1050-1064, 1929.
- [10] E. Sunde, Earth Conduction Effects in Transmission Systems. Dover Publications Inc., 1949.
- [11] H. M. Trueblood y E. Sunde, Lightning Current Observations in Buried Cable, Bell Syst. Tech. J., vol. 28, n.o 2, pp. 278-302, 1949.
- [12] E. Sunde, Surge Characteristics of a Buried Bare Wire, Electr. Eng., vol. 59, n.o 12, pp. 987-991, 1940.
- [13] E. Sunde, Currents and Potentials Along Leaky Ground-Return Conductors, Electr. Eng., vol. 55, n.o 12, pp. 1338-1346, 1936.
- [14] J. Riodan y E. Sunde, Mutual Impedance of Grounded Wires for Horizontally Stratified Two-Layer Earth, Bell Syst. Tech. J., vol. 37, n.o 10, pp. 162-177, 1931.
- [15] J. Hemstreet; W. Lewis.; C. Foust, Study of driven rods and counterpoise wires in high-resistance soil on consumers power company 140-kv system. Electrical Engineering, 1942, vol. 61, no 9, p. 628-633.
- [16] P. Bellaschi; Armington, R. ; Snowden, A Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds—II. Electrical Engineering, 1942, vol. 61, no 6, p. 349-363.
- [17] P. Bellaschi. Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1941, vol. 60, no 3, p. 123-128.
- [18] R. Rüdénberg, Grounding principles and practice I—Fundamental considerations on ground currents. Electrical Engineering, 1945, vol. 64, no 1, p. 1-13.
- [19] B. Gupta; B. Thapar, Impulse impedance of grounding grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, no 6, p. 2357-2362.

[20] Norma IRAM 2281-2

[21] Gish, O; Rooney, W. Measurement of resistivity of large masses of undisturbed earth. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1925, vol. 30, no 4, p. 161-188.

[22] Wenner, F. A method of measuring earth resistivity. US Government Printing Office, 1916.

4. **Resultados obtenidos expresada en indicadores de CyT**

Se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica y estado del arte.

5. **Obstáculos y dificultades halladas durante el desarrollo del plan de trabajo**

Se trabajó con modelización numérica debido al aislamiento social, preventivo y obligatorio que estableció la imposibilidad de la concurrencia a los laboratorios. Durante el año que dura la beca no se pudieron realizar mediciones en el laboratorio ni en campo como estaba previsto.

La falta de conexión y una computadora con la capacidad suficiente para instalar un software de elementos finitos.

6. **Avance académico durante el período de beca (exprese en porcentaje):** 62,79 %

Becario

Evaluación del Directora (validación por sistema)

Evaluación del becario: • **SATISFACTORIO**

Directora
Msc. Ing. Corina Feltan