



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

**ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**ALEJANDRO ROMERO SEPULVEDA
DIEGO ALEJANDRO MANSILLA GOMEZ**

**Programa de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingenierías**

Pereira, Noviembre de 2016

Nota de aceptación:

Firma del director del programa

Firma del director del proyecto

Pereira, Noviembre de 2016

A mi madre por el amor y apoyo que me ha brindado durante toda la vida, por su preocupación y constancia que han hecho de mí una persona de valores y aspiraciones que me han permitido llegar hasta esta instancia.

A mi padre por sus consejos, por enseñarme que a cada día debo hacerles frente a todas las dificultades que se me presentan, que nunca debo dar un paso atrás porque siempre hay un camino para lograr nuestros objetivos.

A mi hermano por su cooperación y enseñanzas que han sido vitales en cada etapa de mi vida.

Y por último a mis compañeros, de los cuales estoy inmensamente agradecido por colaboración y paciencia que han tenido conmigo en todo momento.

Alejandro Romero

A mi madre por el apoyo brindado, que sin duda alguna durante el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor, por cada día hacerme ver la vida de una manera diferente, confiar en mis decisiones, corregir mis faltas y celebrar mis logros.

A mi padre por la confianza que me ha brindado, por los ejemplos de perseverancia y paciencia para afrontar cada día, por los grandes valores que me has inculcado me han permitido a no desfallecer, ni a rendirme ante ninguna dificultad y cumplir los objetivos que me haya propuesto.

Finalmente, a mis amigos y compañeros, que de una u otra forma me han brindado su apoyo además han contribuido a formarme como mejor persona y realizar el cumplimiento de las metas propuestas.

Diego Alejandro Mansilla

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente queremos agradecer a DIOS por habernos dado salud, sabiduría y fortaleza para poder alcanzar nuestros objetivos, por permitir que nos encontráramos para que juntos emprendiéramos el mismo camino, teniendo la certeza de que, con confianza, honestidad y trabajo duro, los grandes sueños se pueden hacer realidad.

Les extendemos un sincero agradecimiento a todos los profesores del programa de Ingeniería Eléctrica por su gran acompañamiento en la formación académica y personal a lo largo de toda la carrera.

Al ingeniero Jorge Humberto Sanz un inmenso agradecimiento por sus explicaciones que en todo momento fueron de vital importancia para realizar este trabajo.

Por último, pero no menos importante un agradecimiento a todos los compañeros que compartieron y aportaron su granito para que esto fuera posible.

Introducción:

Este trabajo pretende mostrar el estado actual de cada uno de los sistemas de puesta a tierra que se han construido para cada edificio de la infraestructura eléctrica de la Universidad.

Se realizó un trabajo de campo en cada instalación en particular, el cual incluye los siguientes puntos:

- 1. Registro fotográfico:** Se hicieron registros fotográficos de los elementos que constituyen el sistema de puesta a tierra de cada edificio, para destacar las anomalías en este sistema, como también las características propias de cada instalación.
- 2. Obtención del perfil de resistividad del suelo:** Se ejecutó el procedimiento establecido como oficial según norma AIEE – IEEE, para la obtención del perfil de resistividad del suelo, con el fin de determinar el valor de resistividad del suelo, el cual sería utilizado para el cálculo del sistema de puesta a tierra.
- 3. Medida del valor de la resistencia de puesta a tierra:** Se ejecutó el procedimiento oficial según normas AIEE – IEEE para la obtención del valor de la resistencia de puesta a tierra del sistema, para cada edificio del campus de la Universidad.

Con la información que se obtuvo para cada sistema eléctrico, correspondiente a cada edificio, se hizo un análisis de la misma y se hizo un diagnóstico, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La seguridad de las personas.
- La protección de equipos eléctricos y electrónicos.

Como objetivo principal de este estudio se establecieron algunas recomendaciones teniendo en cuenta las normas correspondientes para cada caso en particular.

Como referencia bibliográfica principal y con autorización previa, se cita la tesis desarrollada por el I.E. Esp. JORGE HUMBERTO SANZ ALZATE titulada “METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN TELURÓMETRO DE FRECUENCIA VARIABLE”.

CONTENIDO

Introducción:	2
CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN	11
1.1 ESTADO DEL ARTE	11
1.2 CONDICIONES DE LOS TERRENOS.	14
1.3 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN DESDE LA SUPERFICIE DEL TERRENO.	18
1.3.1 Prospección gravimétrica	18
1.3.2 Métodos magnéticos.	18
1.3.3 Sísmica.	18
1.3.4 Métodos eléctricos.	19
1.3.5 Resistividades.	19
1.3.6 Sondeo Eléctrico Vertical.	20
1.3.7 Calicata Eléctrica.	20
1.3.8 Tomografía eléctrica.	20
CAPÍTULO 2	25
METODOLOGÍAS MÁS COMUNES PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	25
2.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.	25
2.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.....	29
2.3. DISPOSITIVOS TETRAELECTRÓDICOS LINEALES BÁSICOS.	30
2.3.1. Dispositivo simétrico de Wenner.....	31
2.3.2 Dispositivo Schlumberger.....	33
2.3.3 Dispositivo polo-dipolo.....	35
2.3.4 Dispositivo doble dipolo.	35
2.3.5 Dispositivos Wenner α , β	36
2.4 TIPOS DE PROSPECCIONES GEOELÉCTRICAS.	37
2.4.1. Sondeo eléctrico vertical.....	37
2.4.1.1 Sondeo Wenner.....	39
2.4.1.2 Sondeo Schlumberger.	40
2.4.1.3 Sondeo bipolar.	40
CAPÍTULO 3	44
MODELOS PARA INTERPRETAR EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.	44
3.1 MODELO DEL TERRENO INVARIANTE CON LA FRECUENCIA.	44
3.2 MODELO DEL TERRENO VARIANTE CON LA FRECUENCIA.	47
3.3 IMPEDANCIA DEL ELECTRODO - TENIENDO EN CUENTA EL ARREGLO GEOMÉTRICO.	51

3.3.1 Circuito equivalente electrodo-electrolito.....	59
3.4 ANÁLISIS DEL TEMA.....	59
CAPÍTULO 4	62
INTERPRETACIÓN DE LA RESISTIVIDAD MEDIANTE EL SONDEO ELÉCTRICO.	62
4.1 RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	62
4.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD EN UN PUNTO (RESISTIVIDA APARENTE).....	64
4.3 SONDEOS ELÉCTRICOS Y CALICATAS ELÉCTRICAS.....	68
4.4 CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE.....	69
4.4.1 Corte geoelectrico.....	70
4.4.1.1 Corte geoelectrico de dos capas.....	70
4.4.1.2 Corte geoelectrico de tres capas.....	74
4.4.1.3 Corte geoelectrico de cuatro capas.....	76
CAPÍTULO 5	79
INFORMACION DE LOS SISTEMAS PARA CADA EDIFICION NOMBRADO	79
5.1 EDIFICIO 1	80
5.1.1 Edificio Administrativo	80
5.1.2 Edificio de Eléctrica.....	82
5.1.3 Edificio de Ciencias Básicas.....	84
5.2 EDIFICIO 2	85
5.2.1 Vicerrectoría de Responsabilidad Social y Bienestar Universitario	86
5.3 EDIFICIO 3	87
5.3.1 Edificio de Sistemas, CRIE, Facultad de Ingenierías, Registro y Control Académico..	88
5.3.2 Transformador Edificio 3.....	89
5.4 EDIFICIO 4	91
5.4.1 Edificio de Mecánica	91
5.5 EDIFICIO 5	93
5.5.1 Edificio de Industrial.....	93
5.6 CAFETERIA CENTRAL “EL GALPÓN”.....	95
5.7 EDIFICIO 6	96
5.7.1 Edificio de Química.....	97
5.8 EDIFICIO 7	98
5.8.1 Edificio de Educación.....	99
5.8.1 Edificio de Comunicación.....	101
5.9 EDIFICIO 8	102
5.9.1 Edificio de Aguas.....	103
5.10 PLANETARIO	104
5.11 EDIFICIO 9	105

5.11.1 Biblioteca - Malla principal	106
5.11.2 Biblioteca – Transformador	107
5.11.2 Biblioteca – Parte Posterior.....	109
5.11.2 Biblioteca – Jardín Interno.....	110
5.12 EDIFICIO 10	112
5.12.1 Edificio de Medio Ambiente.....	112
5.12.2 Edificio de Medio Ambiente - Transformador.....	114
5.13 EDIFICIO 11	115
5.13.1 Jardín Botánico	116
5.14 EDIFICIO 12	117
5.14.1 Edificio de Bellas Artes	117
5.15 EDIFICIO 13	119
5.15.1 Centro Multidisciplinario.....	120
5.16 EDIFICIO 14	122
5.16.1 Edificio de Medicina.....	122
5.17 EDIFICIO 15	123
5.17.1 Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico.	124
CAPITULO 6	127
6.1 EQUIPO UTILIZADO EN EL ESTUDIO.	127
CAPITULO 7	129
7.1 BIBLIOGRAFIA	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema Geológico compuesto por varias capas o estratos.	14
Figura 1.2 Ejemplo de un terreno con dos heterogeneidades.	15
Figura 2.1 Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo.	29
Figura 2.2 Dispositivo de Wenner.....	32
Figura 2.3 Variantes del dispositivo de Wenner	32
Figura 2.4 Dispositivo de Schlumberger.....	33
Figura 2.5 Variantes del dispositivo de Schlumberger.....	34
Figura 2.6 Dispositivo polo-dipolo	35
Figura 2.7 Dispositivo doble dipolo.....	36
Figura 2.8 Dispositivos a -Wenner (izquierda) y b -Wenner (derecha) [4].....	37
Figura 2.9 Principio del SEV. a medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas.....	38
Figura 2.10 Sondeo Wenner. La distancia interelectrónica pasa de a (AMNB) a “na” (A’M’N’B’)	39
Figura 2.11 Sondeo Schlumberger. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos.....	40
Figura 2.12 Sondeo dipolar. Los dipolos se mantienen, aumentando la separación entre ellos.....	40
Figura 3.1 Electrodo puntual de corriente en la superficie de un terreno.....	52
Figura 3.2 Electrodo semiesférico dentro de la superficie de un terreno.	53
Figura 3.3 Electrodo cilíndrico dentro de la superficie de un terreno.	55
Figura 3.4 Modelo simplificado de la impedancia de electrodo	55
Figura 3.5 a) Circuito equivalente de medida de la impedancia de electrodo. b) Tensión medida en R_o	56
Figura 3.6 Impedancia de un par de electrodos adyacentes a diferentes frecuencias.....	58
Figura 3.7 Circuito equivalente del electrodo-electrolito dado por Pollak	59
Figura 4.1 Inyección de corriente en el suelo a través de un electrodo.....	65
Figura 4.2 Inyección de corriente en un terreno por medio de los dos electrodos de una fuente.....	65
Figura 4.3 Disposición de electrodos para la medida de tensión en un terreno.	66
Figura 4.4 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico.....	68
Figura 4.5 Esquema simplificado de una calicata eléctrica.....	69
Figura 4.6 Curva de resistividad del terreno para dispositivo Schlumberger.....	70
Figura 4.7 Trazado de la corriente en un sondeo eléctrico vertical.....	71
Figura 4.8 Curva de resistividad para un suelo de dos capas.	72
Figura 4.9 Posibles curvas de resistividad aparente para un terreno de dos capas “ ρ_1 ”= 100 Ω .m y un espesor de 3 m	73
Figura 4.10 Variación de la curva con el espesor de la capa superior.....	73
Figura 4.11 Curva de resistividad aparente de un terreno con tres capas.....	74
Figura 4.12 Posibles formas de curvas de acuerdo a cada posibilidad.....	75
Figura 4.13 Variación de la curva con el espesor de la segunda capa.....	76
Figura 4.14 Corte geoelectrico de cuatro capas.	77
Figura 4.15 Curva de resistividad aparente para un terreno de cuatro capas.	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen métodos desarrollados, su aplicación y principio de funcionamiento	21
Tabla 2.1. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales.....	28
Tabla No 3.1 Resistividad de varios suelos.....	45
Tabla No 3.2 Resistividad de varios suelos.....	46
Tabla No 3.3 Resistividad de varios suelos.....	46

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ESTADO DEL ARTE.

La evolución tecnológica ha sido el resultado de la preocupación del hombre, para apropiarse del uso de la energía eléctrica en forma adecuada, eficiente y segura, a través de equipos eléctricos, electrónicos, comunicación y demás.

La seguridad de los seres vivos debe ser la preocupación primordial para el diseñador de un sistema integral eléctrico, el cual debe incluir un sistema de puesta a tierra, ya sea de servicio o de protección.

La ingeniería de puesta a tierra se ocupa del eficiente, seguro y económico traspaso de corrientes eléctricas, de diversa naturaleza, hacia la tierra en las variadas instalaciones eléctricas que a diario se usan, para nuestro propio beneficio. El conocimiento y dominio de esta rama profesional son necesarios para los ingenieros en electricidad, quienes ejercen tanto en el ámbito de la técnica de la energía y potencia eléctrica como en el de las comunicaciones eléctricas, considerando la importancia que tiene el proceso de la propagación de las corrientes eléctricas a través de la tierra, ya sea de manera deseable o no. En relación con esto, vale la pena señalar que, desde el inicio de la ciencia eléctrica, el hombre se planteó una serie de interrogantes acerca de la circulación de la electricidad por diversas materias o medios, por ejemplo, el cuerpo humano o por la tierra misma, así como también de sus posibles efectos inmediatos o indirectos.

En la mente inquieta de Stephen Gray, después de haber llevado a cabo, el 14 de julio de 1729, el experimento de la conducción de electricidad a través del cableado de un cordón de 198 m de longitud, le surgió la pregunta. ¿Qué sucederá cuando se use a una persona como conductor de la electricidad? Estos experimentos los realizó posteriormente en 1732. En la actualidad la disciplina médica que contiene sus fundamentos científicos está debidamente documentada a través de la electrofisiología, mientras los aspectos tecnológicos se encuentran enmarcados en la llamada electrofisiología del trabajo, de la cual surgen los requisitos de seguridad que deben ser satisfechos en todo diseño de puesta a tierra para una instalación eléctrica.

Por otra parte, en 1883, Carl August Stenheil logró comprobar que la tierra conducía también la electricidad y que, por lo tanto, podía ser utilizada como circuito de retorno de ésta. Este aporte tecnológico coadyuvó al desarrollo de la telegrafía por un solo hilo. Se

puede pensar que con ello se inicia la técnica de la puesta a tierra dentro del dominio de las comunicaciones eléctricas.

En el rango de las corrientes de gran intensidad (energía y potencia eléctrica) el desarrollo sistemático, científico y técnico de la tecnología de las puestas a tierra tiene su inicio, prácticamente, a principios de este siglo, con la participación de un gran número de investigadores, en su gran mayoría de origen alemán, inglés y norteamericano. Estos en un período que abarca las tres primeras décadas, donde se fueron identificando diversos problemas particulares de la puesta a tierra en los sistemas eléctricos, con lo que se permite integrar la técnica de la puesta a tierra al ámbito de la electrotecnia.

En este grupo de científicos y técnicos, es importante distinguir los investigadores que orientaron su trabajo hacia el ordenamiento, la sistematización y la formulación fisicomatemática (supuestos básicos de la ciencia moderna), de los que trabajaron hacia la resolución de los problemas prácticos en las diversas instalaciones electrotécnicas.

Franz Ollendorf, es considerado sin duda el investigador más completo y formal [1], abordó ciertos problemas particulares de la puesta a tierra, pero también se empeñó en organizar de manera coherente todo el sistema problemático científico que involucra la geología, la geofísica, la teoría de la electricidad como también las matemáticas, todo esto lo hizo en su libro en lengua alemana (Corrientes Telúricas, Stuttgart 1969) [2]. En esencia, el libro es un tratado sobre la geoelectrica orientada hacia la electrotecnia, sustentado fundamentalmente en el principio heurístico de la imagen reflejada, desarrollada por Jhon Thompson, para plantear y resolver problemas especiales de electrostática. El libro es considerado hasta la fecha como un clásico, ya que en él está consignada la teoría científica y/o tecnológica sustantiva de alto nivel que fundamenta la técnica de la puesta a tierra en todas las regiones y campos de la electrotecnia, tales como la corriente continua y/o baja frecuencia, corriente alterna rápida y/o alta frecuencia, así como la corriente que se propaga como onda electromagnética de impulso. Con base en tales teorías se edifica la tecnología sustantiva de la ingeniería de la puesta a tierra; no es por demás reseñar que la filosofía de la ciencia acepta que pueden existir teorías diferentes para abordar y resolver un mismo problema científico, siempre y cuando cumplan los requisitos básicos para ser consideradas como teorías científicas [3].

“Para reafirmar sobre el interés que se tiene sobre el tema, en las primeras tres décadas de este siglo se llegó a conformar la masa crítica de la técnica de la puesta a tierra, puesto que al indagar sobre los escritos presentados a la IEEE se tiene que entre 1961 y 1979 se consolidaron 300 documentos técnicos, sin considerar los aportes e investigadores norteamericanos, en estos documentos se sigue profundizando en los diversos problemas de la puesta a tierra en las instalaciones de energía eléctrica, pero también explorando nuevas metodologías de análisis y experimentación con base en las facilidades del cálculo computarizado, lo cual constata la vigencia de tal problemática” [1].

“No obstante lo anterior, es evidente y hasta contradictorio, que la aguda escasez de información científica y tecnológica fundamental (libros) a nivel internacional sobre la materia, la difícil consecución de material bibliográfico, debido al idioma en que están escritos y al enfoque con que tratan la problemática (con todo rigor científico o bien, demasiado concisos)” [1].

El entorno de la ingeniería de puesta a tierra es una tecnología de la acción inmersa dentro del ámbito de la electrotecnia; sin embargo, toda tecnología de acción, está constituida con base a una estructura científica muy sólida sobre la cual se edifica tecnológicamente, cuyos cimientos se soportan con conocimientos tecnológicos sustantivos y de acción, así como también con reglas tecnológicas. La estructura de conocimientos científicos comprende elementos de disciplinas que encajan dentro del dominio de las llamadas ciencias de la tierra, y precisamente en la geología, en sus ramas: geofísica y geoquímica. La geofísica es la de mayor aporte con algunas de sus disciplinas, como por ejemplo, el geomagnetismo, la geoelectricidad, y la electricidad atmosférica [1].

La geoelectrica se ocupa del estudio de la circulación de la electricidad dentro de la tierra y de los fenómenos eléctricos y magnéticos involucrados, por tal razón se le considera como la tecnología sustantiva de la ingeniería de puesta a tierra. Las corrientes a tierra, son de especial interés, tales como las de alta intensidad, las cuales tienen su origen en los sistemas creados por el hombre y las relacionadas con las descargas atmosféricas. En la geoelectrica interviene, la ciencia de la electricidad con sus fundamentos teóricos; y la geotécnica ¹con elementos importantes.

“Cuando se hace un enfoque de los fundamentos científicos y tecnológicos de la ingeniería de puesta a tierra se encuentra que se trata de una teoría formal y densa, cuyo análisis riguroso requiere el manejo de alrededor de 1600 funciones físico-matemáticas. Es una teoría que se fundamenta con base en la física y en la química del globo terráqueo y estructurada racionalmente gracias a la lógica y el formalismo de la matemática; es capaz de describir todos los fenómenos que se suceden en el seno de la tierra cuando circulan a través de ella una corriente estacionaria, casi estacionaria, de alta frecuencia y transitoria de impulso. En consecuencia, el análisis riguroso, completo y detallado de esos fundamentos es difícil y hasta cierto punto tedioso, exigiendo, además, invertir mucho tiempo para lograrlo. Asimismo, el análisis riguroso y su formulación científica no son generalmente las más apropiadas para satisfacer los objetivos que persigue la ingeniería” [1].

En la formulación de la ingeniería de puesta a tierra también participan de manera importante argumentos de otras ciencias y de la filosofía de la misma; por ejemplo, la ciencia social, en el campo de la sociología, psicología del trabajo, la técnica de la seguridad; campos de las ciencias biológicas, como la higiene en el trabajo, la medicina del

¹ Ciencia aplicada que se ocupa de las propiedades físicas de los materiales que se encuentran en el terreno

trabajo y la electrofisiología del trabajo² y por supuesto, la ciencia de los sistemas³ participa también de manera importante con su metodología para el tratamiento racional de los problemas complejos de las instalaciones de puesta a tierra, los cuales conforman verdaderos sistemas técnicos: los sistemas de puesta a tierra. [1].

Sucede también que en la ingeniería de puesta a tierra, como en toda ingeniería, los aportes de investigadores prácticos, los cuales se conocen en el ámbito científico como teorías tecnológicas de la acción⁴ son las más recomendables para la solución de los problemas prácticos de carácter general, pero por supuesto, no pueden descartarse a priori casos en que será necesario recurrir no sólo a la teoría tecnológica sustantiva, sino a la teoría científica rigurosa para resolver problemas muy especiales que se pueden presentar en la práctica.

1.2 CONDICIONES DE LOS TERRENOS.

Uno de los factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un sistema de puesta a tierra es la condición del terreno a través del cual va a circular la corriente; ello involucra entonces no sólo al volumen de terreno sobre el cual esté emplazado el sistema de puesta a tierra, sino también el de sus alrededores. En realidad, el terreno debe ser considerado como un sistema geológico y geoelectrico.

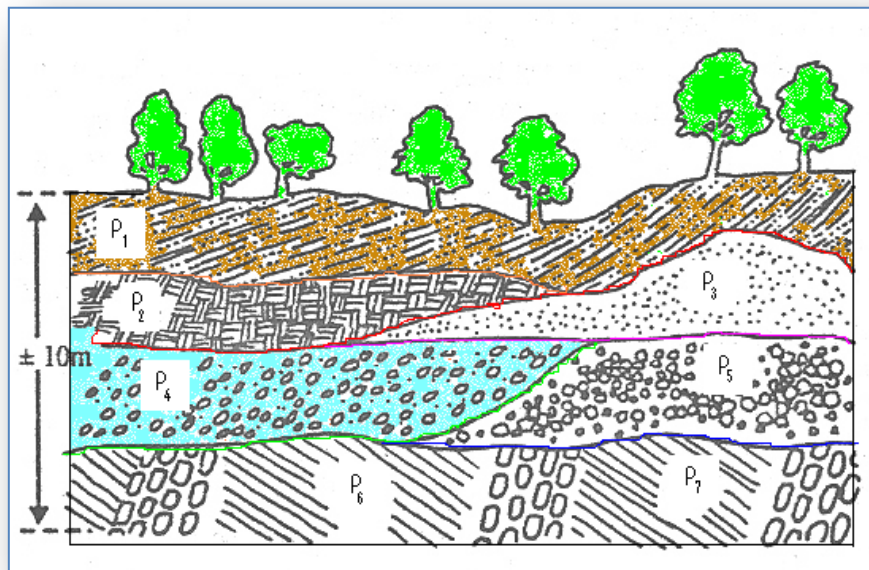


Figura 1.1 Sistema Geológico compuesto por varias capas o estratos.

² Con base en la cual se debe diseñar todo sistema de puesta a tierra.

³ Por medio de la técnica de los sistemas.

⁴ Desarrollos empíricos.

Donde “ ρ_1 ”, “ ρ_2 ”, “ ρ_3 ”, “ ρ_4 ”, “ ρ_5 ”, “ ρ_6 ”, “ ρ_7 ” corresponde a las resistividades de cada capa o estrato del terreno.

El cálculo de la resistencia de un sistema de puesta a tierra conformado por un electrodo sencillo o múltiple, se hace con base al valor de la resistividad del terreno en el cual este está inmerso, la cual varía en un amplio rango, según sus condiciones geológicas y geofísicas, ver la figura 1; por conveniencia los análisis más comunes suponen terrenos homogéneos, es decir, que el terreno posee la misma naturaleza geológica y geofísica en el volumen de tierra ilimitado por todos los lados en el que está emplazado el sistema de puesta a tierra y por el cual las líneas de corriente se propagan; sin embargo, la realidad es otra, la mayoría de los casos el terreno es de naturaleza heterogénea y su respuesta varía de acuerdo a sus componentes, a la condición geológica y en mayor o menor grado de importancia a la frecuencia de la corriente que lo atraviesa, esto deriva en un comportamiento del sistema de tierra distinto, de manera parcial o total, al que se esperaba según el cálculo hecho para un terreno homogéneo, ya que el valor de la conductividad o de la resistividad del suelo, ya no corresponde a esa clase de terreno.

En la práctica se puede identificar alrededor de once clases de heterogeneidades que se presentan en determinados terrenos; algunas de ellas originan sólo pequeñas modificaciones de comportamiento con respecto al cálculo homogéneo, las cuales bien pueden ser ignoradas, por el contrario algunas de ellas si dan lugar a variaciones importantes que ya no deben ser despreciadas (el subsuelo mucho mejor conductor que el suelo o viceversa), por lo que, en rigor, tienen que ser consideradas durante la fase del cálculo del sistema de electrodos; en la figura 2 se presentan dos de tales heterogeneidades [1].

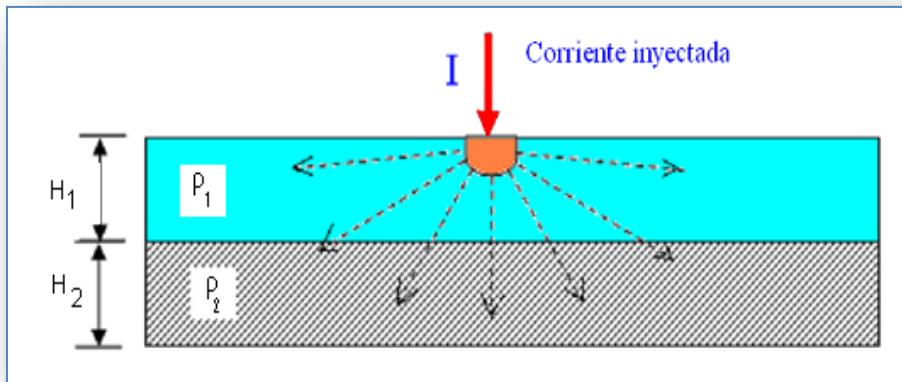


Figura 1.2 Ejemplo de un terreno con dos heterogeneidades.

Dónde: “ ρ_1 ”, “ ρ_2 ” es la resistividad de cada capa o estrato y “ H_1 ”, “ H_2 ” es la profundidad correspondiente de cada estrato.

Si bien la teoría científica permite llegar a una expresión matemática para indagar la conductividad microscópica, es en verdad muy difícil de aplicar en la práctica y, por otro lado, aunque los efectos de ciertas heterogeneidades son relativamente sencillos de determinar en electrodos elementales, no resulta así en el caso de electrodos múltiples. De ahí que en la ingeniería de puesta a tierra se establezca (como en toda tecnología) que aun con la aplicación de la mejor teoría y con las facilidades más sofisticadas, se deje asumir que el resultado será aproximado y que, por tanto, tendrá que ser mejorado con base en mediciones de campo y las modificaciones consecuentes.

Por supuesto los efectos de tales heterogeneidades tienen consecuencias diferentes sobre el comportamiento del sistema de electrodos, según se trate de la instalación de puesta a tierra pequeña, mediana o de gran dimensión. Por ejemplo, durante el cálculo del sistema de puesta de electrodos para una extensa subestación (de extra alta tensión) es imprescindible una investigación minuciosa del subsuelo del terreno en que se emplazará, pero también de sus alrededores; no hacerlo puede dar lugar a un dimensionamiento erróneo, es decir, que resulte sobredimensionado o, por el contrario, ineficiente (técnica y socialmente) influyendo, por supuesto, en el costo.

La investigación de las condiciones del terreno involucra la búsqueda de las características geotécnicas, siendo el sondeo eléctrico a una profundidad que puede variar de 6 a 8 metros, su soporte principal y práctico. Con base en esta exploración se logra determinar las conductividades (o las resistividades) de las diversas capas del terreno (en el caso que se trate de un terreno ordenado por capas) sobre el cual estará emplazada la subestación; a partir de ello se puede entonces determinar la conductividad macroscópica (o efectiva) del volumen de terreno que más trasciende en el cálculo de la resistencia a la propagación del sistema de electrodos, el cual se debe realizar con base en la conductividad efectiva. En principio, los resultados de tal investigación pueden ser varios, previendo una variación horizontal entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Que la conductividad no varíe (terreno homogéneo, casos muy especiales y escasos).
- Que la conductividad aumente con la profundidad (subsuelo mejor conductor).
- Que la conductividad disminuya con la profundidad (subsuelo menor conductor).

“Pero si la variación es vertical el problema es un poco más complicado de analizar. Así por ejemplo, cuando el subsuelo es mejor conductor que la capa de terreno cercana a la superficie el suelo, al efectuar los cálculos pertinentes se puede llegar a un valor de conductividad 10% mayor, lo que significa que la resistividad efectiva es sólo un décimo de la considerada originalmente como homogénea (resultante de una medición de la conductividad sólo de la capa superior de terreno), lo cual influirá demasiado en el cálculo del electrodo (sólo 10 Ω .m en lugar de 100 Ω .m); por supuesto, cuando el subsuelo sea peor conductor que la capa superior, sucederá lo contrario. Lo anterior, como ya se ha

mencionado, en los sistemas de tierra extensos representa un grave error, en consideración sus consecuencias técnicas, económicas y sociales (seguridad de las personas, cuestión central de todo diseño de sistema de tierra)” [1].

Teniendo en cuenta la información revisada, en la práctica de la ingeniería de puesta a tierra es necesario, y en ciertos casos, implementar un procedimiento que permita adoptar una metodología para la exploración eléctrica de un terreno en particular, por ejemplo, el método basado en el dispositivo Wenner, es actualmente uno de los más utilizados para determinar la resistividad de terreno en capas, aun cuando presenta ciertas limitaciones.

“La geofísica estudia la tierra en su composición y dinámica sobre la base de medidas de tipo físico que normalmente se realizan desde la superficie del planeta. Cuando este estudio tiene que ver con áreas relativamente pequeñas y profundidades que no sobrepasen como máximo unos pocos kilómetros, para obtener un fin económico inmediato, se habla de geofísica aplicada, y el conjunto de métodos para obtener ese fin constituyen la prospección geofísica” [1].

Se puede relacionar la composición del subsuelo mediante algún parámetro físico medido en la superficie, que puede ser la velocidad de una onda mecánica, o variaciones de un campo gravitacional producidas por diferencias de densidad, o la intensidad de una corriente eléctrica asociada a la mayor o menor facilidad de propagación de las cargas eléctricas.

La mayoría de los métodos desarrollados han ofrecido una forma de obtener información detallada acerca de las condiciones del suelo y de las rocas del subsuelo con el fin de conducir a tierra señales de corriente de baja frecuencia típicas de un sistema eléctrico de potencia. Esta capacidad de caracterizar rápidamente las condiciones del subsuelo sin perturbar el sitio, ofrece el beneficio de costos más bajos y menor riesgo, dando mejor entendimiento general de las condiciones complejas del sitio. Es necesario a menudo utilizar más de un método para lograr obtener la información necesaria y suficiente para desarrollar un sistema de puesta a tierra acorde con las exigencias del medio como es la conducción a tierra de fallas a baja frecuencia y alta frecuencia como el despeje de descargas eléctricas atmosféricas que impactan o se inducen en los sistemas eléctricos.

Para poder aplicar un método geofísico en una prospección es necesario que se den dos condiciones importantes:

- Que existan contrastes significativos, anomalías que se pueden detectar y medir.
- Que estos contrastes se puedan correlacionar con la geología del subsuelo.

1.3 MÉTODOS DE PROSPECCIÓN DESDE LA SUPERFICIE DEL TERRENO.

Se hará una breve reseña histórica de los métodos que se han desarrollado, destacando su utilización y el alcance respecto a la caracterización del terreno, con base en los parámetros geofísicos que este posee.

1.3.1 Prospección gravimétrica.

El método está basado en el estudio de la variación de la componente vertical del campo gravitatorio terrestre. Se realizan mediciones relativas, es decir se miden las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar al otro puesto que en estas mediciones se pueden lograr una precisión satisfactoria más fácilmente en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto [4].

El método gravimétrico se emplea como un método de reconocimiento general en hidrología subterránea para definir los límites de los acuíferos (profundidad de las formaciones impermeables, extensión de la formación acuífera, naturaleza y estructura de las formaciones del subsuelo).

1.3.2 Métodos magnéticos.

La tierra es un imán natural que da lugar al campo magnético terrestre. Las pequeñas variaciones de este campo pueden indicar la presencia en profundidad de sustancias magnéticas. El método magnético sirve para dar información sobre el basamento y su profundidad particularmente para entornos cristalinos y metamórficos. De igual manera ayudará a estudiar la geología regional y estructural.

1.3.3 Sísmica.

Produciendo artificialmente un pequeño terremoto y detectando los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas, se puede obtener una imagen muy aproximada de las discontinuidades sísmicas.

Estas discontinuidades coinciden generalmente con las discontinuidades estratigráficas.

Los métodos sísmicos se dividen en dos clases [4]:

- El método sísmico de **reflexión** es el más empleado en prospección petrolífera ya que permite obtener información de capas muy profundas. Permite definir los límites del acuífero hasta una profundidad de 100 metros, su saturación (contenido de agua) y su porosidad. Permite también la localización de los saltos de falla.
- El método sísmico de **refracción** es un método de reconocimiento general especialmente adaptados para trabajos de ingeniería civil, prospección petrolera, y estudio hidrogeológico. Permite la localización de los acuíferos (profundidad del sustrato) y la posición y potencia del acuífero bajo ciertas condiciones.

1.3.4 Métodos eléctricos.

Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de las rocas y minerales, y más especialmente su resistividad. Generalmente emplean un campo artificial eléctrico creado en la superficie por el paso de una corriente en el subsuelo.

Se emplean como métodos de reconocimiento y de detalle, sobre todo en prospección de aguas subterráneas. Los mapas de isoresistividad permiten definir los límites del acuífero, el nivel del agua en los acuíferos, la presencia de agua salada y permite la cartografía de las unidades litológicas.

Los métodos geoelectrónicos pueden clasificarse en dos grandes grupos [4]:

- En los métodos **inductivos** se trabajan con corrientes inducidas en el subsuelo a partir de frecuencias relativamente altas (entre 100 Hz y 1 MHz).
- En el caso de los métodos **conductivos** se introduce en el subsuelo una corriente continua o de baja frecuencia (hasta unos 15 Hz), mediante electrodos.

Los métodos eléctricos de prospección geofísica comprenden variedad de técnicas que emplean tanto fuentes naturales como artificiales, de las cuales éstas son de aplicación más amplia.

1.3.5 Resistividades.

El método llamado de resistividades es, sin duda, en todas sus modalidades el más importante de todos los métodos eléctricos.

Este método permite suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad [4].

El método de resistividades permite no sólo el estudio de formaciones sub-horizontales, sino también la determinación de formaciones subverticales (fallas, filones, zonas de contacto, etc.).

1.3.6 Sondeo Eléctrico Vertical.

El más importante de los métodos que utilizan corriente continua producida por generadores artificiales es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Encuentra su aplicación principal en regiones cuya estructura geológica se puede considerar formada por estratos horizontales. La finalidad del SEV es la determinación de las profundidades de las capas del subsuelo y las resistividades o conductividades eléctricas de las mismas, mediante mediciones efectuadas en la superficie.

1.3.7 Calicata Eléctrica.

La calicata eléctrica constituye una aplicación de estos métodos en la que se trabaja con distancia inter-electródica constante. La calicata se emplea principalmente para detectar y delimitar cambios laterales en la resistividad.

1.3.8 Tomografía eléctrica.

Con tomografía eléctrica se entiende la visualización de alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general) mediante secciones continuas, generalmente verticales, pero ya se trabaja en tres dimensiones. Esta metodología es intensiva y de alto detalle o resolución y permite no solamente la prospección de los acuíferos, sino que mediante su observación en el tiempo, se puede ver la dinámica hídrica. Actualmente se está usando, por ejemplo en controles de contaminantes.

En el caso de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT: Electrical resistivity tomography), el subsuelo se considera compuesto por una serie de elementos finitos de la misma forma, aun cuando no del mismo tamaño, cada uno de ellos con la posibilidad de tener diferente resistividad.

Métodos	Principios	Parámetros obtenidos
Geoeléctrico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena-arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación
Sísmica de refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento
Sísmica de reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zonas de fallas, cartografías de estructuras de recubrimiento
Gravimetría	Densidad	relleno-basamento
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral
Electromagnetismo	Conductividad o resistividad eléctrica y magnetismo	Localización de las áreas más conductivas, detección de fracturas que no afloran en superficie

Tabla 1.1 Resumen métodos desarrollados, su aplicación y principio de funcionamiento [4].

Otros métodos más recientes.

- Resonancia Magnética Protónica (en inglés Magnetic Resonance Sounding - MRS) sirve para medir de manera directa la presencia de agua en las zonas saturadas y/o no saturadas de los acuíferos. El MRS permite estimar las propiedades del acuífero como cantidad de agua, porosidad o permeabilidad hidráulica.
- Geo-Radar o GRP (Ground Penetrating Radar) es un método eléctrico particular utilizando fuentes de corriente alterna donde se usa la reflexión de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia (80 a 500 MHz). Permite, de manera versátil y rápida, la investigación a poca profundidad del subsuelo.
- Tomografía electromagnética por radio-ondas. Este método se utiliza para investigar la estructura geológica.

- Métodos magnetotelégrafo. Permiten definir los límites de acuíferos, zonas de alta transmisividad, variaciones de permeabilidad y la localización de sistemas de fracturas.
- Polarización Inducida. Este método está basado en el estudio de la cargabilidad del subsuelo. Permite la localización de contaminación por hidrocarburos.
- Estudios en suelo homogéneo con señales a baja frecuencia.
- Análisis transitorio de las puestas a tierra. Sistemas no lineales (recientes)

En la biografía consultada y revisada, se explican muchos métodos para caracterizar el suelo por medio de parámetros eléctricos y todos han desarrollado una metodología para hacerlo, algunos de ellos son utilizados en la actualidad a pesar de las limitaciones que tienen y otros que se están abriendo paso, tales como el análisis transitorio de los parámetros eléctricos, que fundamentan su razón de ser en los fenómenos transitorios, (descargas atmosféricas) los cuales hacen parte del entorno de los sistemas eléctricos, los cuales el ingeniero eléctrico debe estar presto a controlar.

Un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas está compuesto por dos unidades fundamentales: La primera la conforman los elementos que interceptan la descarga y la conducen hacia el suelo y la segunda está conformada por la puesta a tierra que es la encargada de distribuir dichas corrientes transitorias en el terreno.

El propósito de estudiar la forma en la cual se distribuyen las corrientes a través de los electrodos de puesta a tierra y la aparición de potenciales transitorios en el momento de la falla, es evaluar los riesgos a los que se exponen las personas que se encuentren cerca del sistema afectado, como también los niveles de tensión a los que se someten los equipos.

Otra parte importante de los sistemas de protección, son los dispositivos que disminuyen las tensiones transitorias a niveles tolerables para las instalaciones eléctricas, los cuales inyectan corrientes transitorias cuando operan despejando la falla.

La obtención de las tensiones en diferentes puntos de la puesta a tierra, permite realizar los análisis para asegurar que los diseños y dimensionamiento de los equipos de protección interna sean acordes con los requerimientos de las instalaciones y así evitar lesiones a personas o daños en los demás equipos y aparatos en las instalaciones. Esta es la justificación para llevar a cabo el estudio del comportamiento transitorio de las puestas a tierra y realizar un análisis detallado de las mismas.

Para realizar dichos estudios, es necesario tener un conocimiento previo de las características físicas y eléctricas del terreno donde va a funcionar un sistema de puesta a

tierra y es el punto de partida del ingeniero que requiera diseñarlo. Los resultados están sujetos al modelamiento real o aproximado del terreno, los cuales influyen de manera directa en el comportamiento deseado del sistema, para su debida utilización; si por el contrario el modelamiento no presenta una buena aproximación, los resultados presentaran errores no admisibles con posibilidad de falla en equipos y peor aún, de pérdida de vidas humanas. Es por esto que el modelamiento del terreno debe ser riguroso.

“Debido a que el cálculo de las tensiones transitorias puede ser llevado a cabo con diferentes métodos de análisis, se debe emplear un modelo que presente mayor versatilidad referente a las geometrías de los electrodos y menor complejidad en la formulación matemática. Uno de los modelos que se presta para el estudio transitorio de las puestas a tierra es el Modelo Electromagnético Híbrido (MEH), el cual permite analizar cualquier configuración de electrodos de puesta a tierra compuesta por conductores rectos y delgados inmersos en el terreno” [5].

A pesar de que la formulación matemática del MEH es sencilla, esta requiere de muchos cálculos matemáticos repetitivos que sólo pueden ser llevados a cabo con herramientas computacionales con el propósito de que sea ágil para el diseñador. La documentación de dicho método se puede revisar en el capítulo 4 y los apéndices A, B, C, D J.H. Montaña [5].

El presente documento pretende establecer criterios para el desarrollo de una metodología que permita el diseño de dispositivos que utilicen la metodología de la prospección geoelectrica, sustentando dichos criterios en investigaciones recientemente, las cuales permiten plantear cambios en las metodologías de manera apropiada con el fin de superar las limitaciones y establecer una valoración más apropiada de los parámetros eléctricos del suelo, fundamentando dichos cambios en la variación de los parámetros eléctricos del terreno con respecto a la frecuencia de la señal eléctrica aplicada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS - CAPÍTULO 1

- [1] de la Vega, Miguel O. “Ingeniería de puesta a tierra. Colección de textos politécnicos” – Limusa – 1998.
- [2] Ollendorf, F. Erdstroeme, (Corrientes telúricas), “Birkhauser Verlag”, basel u Stuttgart. 1969
- [3] Bunge, M. “La Investigación Científica”. Editorial Ariel, 1969.
- [4] Cassulla, M. F. “Tesis doctoral presentada en la Universitat Politècnica de Catalunya para la obtención del título de doctor”, Barcelona 1999.
- [5] E. MSc. JOHNY H. MONTAÑA C. “Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de Doctor en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia facultad de ingeniería Bogotá”, abril de 2006.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍAS MÁS COMUNES PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad caracterizar el suelo a partir de las estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada (magnitud y frecuencia).

Este capítulo consta de 6 apartados, los cuales revisan los siguientes temas:

- El apartado 2.1 revisa el concepto de resistividad eléctrica y muestra las resistividades típicas de algunos suelos.
- El apartado 2.2 describe cómo se realiza la medida de resistividad con el método resistivo.
- El apartado 2.3 describe los dispositivos tetraelectródicos básicos.
- El apartado 2.4 describe los tipos de prospecciones normalmente realizadas con el método resistivo.

• **2.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.**

La resistividad eléctrica r de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad “ σ ” como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección “ s ” y longitud “ l ” la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (2.1)$$

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (2.2)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio por metro [$\Omega \cdot m$]. La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el Siemens (S).

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad, compactación y la frecuencia de la corriente de la señal de prueba.

Estrictamente hablando todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica, y su contexto teórico se define así:

- Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores.
- Los cuerpos con conductividad iónica se conocen como electrolitos si no presentan forma gaseosa.

“El mecanismo de la conductividad de los metales puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que éstos forman, sin vinculación a ninguno determinado. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número redundan en una conductividad muy elevada. Su resistencia aumenta con la temperatura y con el contenido de impurezas. La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre 10^{-8} y 10^{-7} $\Omega \cdot m$. Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que posean conductividad metálica. Entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño) y quizá algún mineral poco abundante como la ullmannita (NiSbS)”[4].

Los minerales semiconductores son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo. Además, su conductividad aumenta con la temperatura. Por ello, no cabe esperar que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda representarse por un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios. En general los telururos y los arseniuros son

conductores muy buenos. Los sulfuros suelen entrar también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio.

Los óxidos, y los compuestos de antimonio suelen ser malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no suelen aparecer en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones, y junto con una ganga frecuentemente aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo que la resistividad conjunta del filón puede variar mucho de unos casos a otros.

En los cuerpos dieléctricos o aisladores, los electrones están fuertemente ligados a los átomos. Esto puede deberse a que existan enlaces covalentes o iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrólito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a $10^7 \Omega \cdot m$ [4]. Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros. Entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aisladoras si no fuera por la presencia de electrolitos.

“El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos $10^5 \Omega \cdot m$ por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl. Así las aguas de lagos y arroyos de alta montaña varían entre $10^3 \Omega \cdot m$ y $3 \times 10^3 \Omega \cdot m$, las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a 20 $\Omega \cdot m$, y las aguas marinas tienen una resistividad de unos 0,2 $\Omega \cdot m$ ” [4].

“Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. La resistividad de las rocas puede variar en margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros”. La tabla 2.1 presenta una tabla de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales [6].

La resistividad de las rocas también depende de la temperatura a la que se encuentre ya que la temperatura influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. En concreto, un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico mal conductor. Por último, cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que

estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan *anisotropía*. La formación de estratos puede producir anisotropía. Tal es el caso de las rocas sedimentarias. En general este efecto será débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca.

Naturaleza terreno	Resistividad en [$\Omega \cdot m$]
Terrenos pantanosos	± 3 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena arcillosas	50 a 500
Arena sílice	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 5000
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1500 a 10000
Granito y gres muy alterado	100 a 600

Tabla 2.1. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales [6]

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

Una limitación del método resistivo es su alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la conductividad cerca de la superficie, debido por ejemplo al contenido de humedad. Hablando en términos electrónicos, el nivel de ruido es alto. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que los flujos de corrientes telúricas se concentran en los

valles y se dispersa en las colinas. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías debido solo a la topografía [6].

• **2.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO.**

La Figura 2.1 ilustra el principio funcionamiento de un dispositivo de medida de la resistividad del suelo: mediante una fuente de corriente, se inyecta una corriente “I” entre el par de electrodos “AB” y se mide la tensión “ΔV” entre el par de electrodos “MN”. Si el medio es homogéneo de resistividad “ρ”, la diferencia de tensión en los terminales “MN” se puede calcular así [7]:

$$\Delta V = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \tag{2.4}$$

Donde “AM”, “AN”, “BM”, “BN” son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I} \tag{2.5}$$

Así “g” es el factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos.

$$g = 2 \cdot \pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \tag{2.6}$$

De hecho, (2.5) es equivalente a (2.2) pero con un factor geométrico diferente

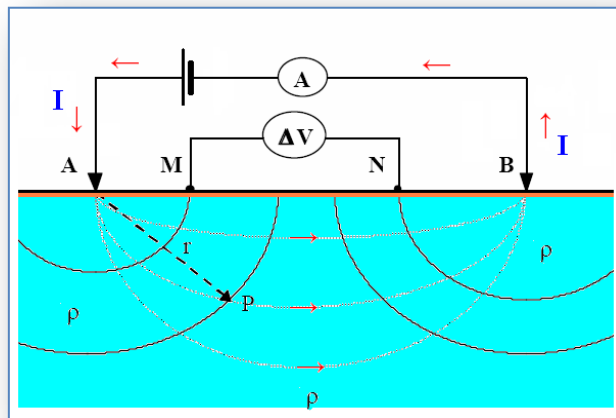


Figura 2.1 Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo.

Dos dispositivos tetraelectrónicos lineales se pueden obtener (los cuatro electrodos están en línea) a partir del original, intercambiando los electrodos de inyección y detección, por tanto el factor geométrico de cada dispositivo se puede calcular así:

$$g_1 = 2.\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

$$g_2 = 2.\pi \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

Dado que las distancias “AM”=”MA”, “AN”=”NA”, etc., se logra que “ g_1 ” = “ g_2 ”. Ahora si el medio es homogéneo, y suponiendo que corriente de inyección regresa a la fuente, las tensiones leídas “ ΔV_1 ” y “ ΔV_2 ” serán iguales. Por tanto, la resistividad medida “ ρ ” será independiente de la posición de los electrodos de inyección y detección cuando estos se intercambian. Esta propiedad se conoce con el nombre de principio de reciprocidad, que se cumple también para medios heterogéneos [7]. No obstante, en la práctica no es conveniente colocar los electrodos “M” y “N” tan separados como suelen estar los “A” y “B”, pues al ser grande la distancia entre los primeros, la medida se vería afectada por las corrientes telúricas, espurias industriales, etc., cuyo efecto aumenta proporcionalmente con la distancia entre “M” y “N”.

Los cálculos anteriores se basan en la consideración de que el suelo es homogéneo e isótropo. Cuando el medio no es homogéneo, se dice que se obtiene la medida de la resistividad aparente, “ ρ_a ”⁵, y su valor depende, además del factor geométrico “ g ”, y de las resistividades de los diferentes materiales que se encuentran en el suelo. A partir de la interpretación de las resistividades aparentes medidas en un terreno se podrán extraer conclusiones sobre la composición estructural del subsuelo (número de estratos existentes, etc).

• 2.3. DISPOSITIVOS TETRAELECTRÓDICOS LINEALES BÁSICOS.

En cualquier dispositivo de medida que utilice cuatro electrodos auxiliares para inyectar corriente al terreno, se le conocemos el factor geométrico “ g ”, la corriente eléctrica “ I ” inyectada por los electrodos “A” y “B”, y la diferencia de potencial entre los electrodos “M” y “N”, se calcular la resistividad aparente mediante la expresión 2.5. Los dispositivos tetraelectrónicos lineales más utilizados son los siguientes:

⁵ Se habla de resistividad absoluta en materiales conductores (cobre, aluminio, etc)

2.3.1. Dispositivo simétrico de Wenner.

Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden *AMNB* (Figura 2.2)

La ecuación básica de Frank Wenner establece que la resistividad aparente de un terreno se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4.\pi.a.R}{1 + \frac{2.a}{\sqrt{(a^2 + 4.b^2)}} - \frac{a}{\sqrt{(a^2 + b^2)}}} \quad (2.9)$$

Donde se tiene que:

“*a*” = Separación horizontal entre dos electrodos consecutivos. [m]

“*b*” = Profundidad de enterramiento del electrodo. [m]

“*R*” = Cociente entre la tensión medida en los electrodos *MN*, y la corriente inyectada [Ω].

“ ρ ” = Resistividad [$\Omega.m$]

Si para la expresión 2.9 se tienen en cuenta las siguientes apreciaciones:

- Si la distancia “*a*” no es muy grande en comparación con la longitud “*b*” se reduce la expresión a:

$$\rho = \frac{4.\pi.a.R}{N} \quad (2.9)$$

Si “*a*” = “*2.b*” se tiene que “*N*” = 1.5198

Si “*a*” = “*4.b*” se tiene que “*N*” = 1.8188

Si “*a*” = “*10.b*” se tiene que “*N*” = 1.9661

Si “*a*” = “*20.b*” se tiene que “*N*” = 1.9847

- Si “*a* > 20.*b*” entonces se puede aproximar la ecuación (2.9) a:

$$\rho = 2.\pi.a.R \quad (2.10)$$

Ahora el factor geométrico del dispositivo se deduce de la expresión (2.6),

$$g = 2\pi a \tag{2.11}$$

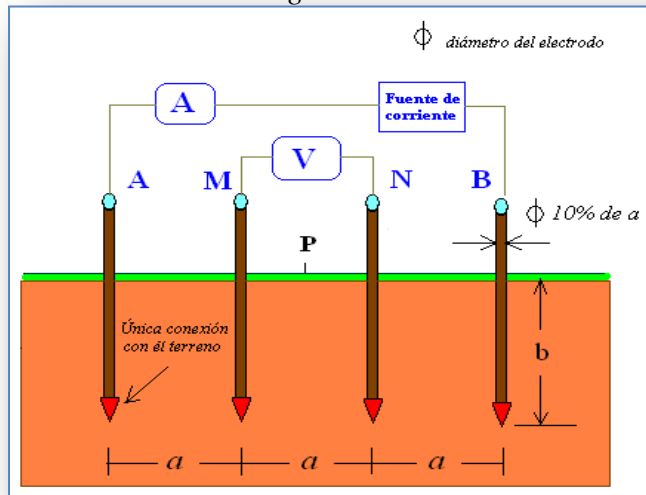


Figura 2.2 Dispositivo de Wenner.

En la siguiente figura (2.3) se pueden apreciar las posibles variantes al método inicial planteado por Wenner:

Disposición de los Electrodo.	Coficiente del Dispositivo	$a > 20p$
	$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(\frac{1}{3} + \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4p^2}} + \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} \right)}$	$\rho = 6\pi a R$
	$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(\frac{2}{3} + \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} - \frac{a}{\sqrt{9a^2 + 4p^2}} \right)}$	$\rho = 3\pi a R$
	$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(\frac{2}{3} + \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} - \frac{a}{\sqrt{9a^2 + 4p^2}} \right)}$	$\rho = 3\pi a R$

Figura 2.3 Variantes del dispositivo de Wenner

2.3.2 Dispositivo Schlumberger.

Se trata de una composición simétrica de los electrodos “AMNB” dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores “MN” es mucho menor que la de los inyectores “AB” (Figura 2.4). En la práctica, “AB” > “5MN”.

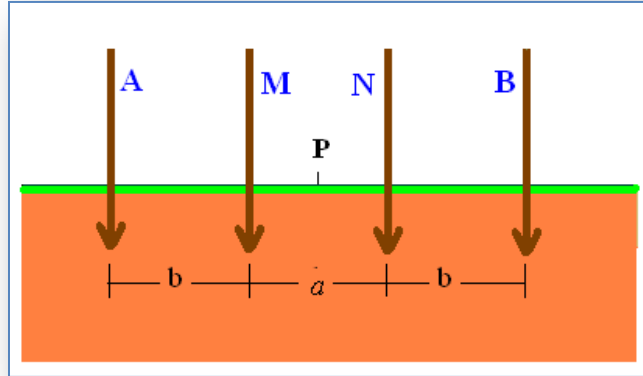


Figura 2.4 Dispositivo de Schlumberger.

El coeficiente del dispositivo en este caso es:

$$g = \frac{\pi \cdot b \cdot (b + a)}{a} \quad (2.10)$$

Si definimos “ $L = b + a/2$ ”, el factor geométrico se puede expresar como:

$$g = \pi \cdot \left[\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right] \quad (2.11)$$

Si la distancia “ a ” que separa los electrodos “M” y “N” tiende a cero ($a \rightarrow 0$), el factor geométrico se puede aproximar así:

$$g = \pi \cdot \left[\frac{L^2}{a} \right] \quad (2.12)$$

Se puede ver que su valor tiende a infinito. Sin embargo, la resistividad aparente es finita ya que “ ΔV ” en (2.5) decrece al mismo tiempo que “ a ”. Tendremos, pues:

$$\rho_a = \lim_{x \rightarrow 0} \pi \frac{L^2}{a} \cdot \frac{\Delta V}{I} = \pi \cdot \frac{L^2}{I} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \pi \cdot \frac{L^2}{I} \cdot E \quad (2.13)$$

Donde “ E ” es el campo eléctrico aplicado. La idea del dispositivo Schlumberger consiste, pues, en utilizar una distancia “ MN ” = “ a ” muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que medimos realmente es el campo “ E ”, el cual en la práctica se toma igual a “ $\frac{\Delta V}{a}$ ”.

Trabajar con el campo eléctrico da ventajas teóricas a la hora de trabajar con expresiones analíticas. El inconveniente es que la tensión diferencial medida disminuye linealmente con la separación “ a ” y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia “ L ”. Además, la precisión de las mediciones geoelectricas de campo está muy limitada por heterogeneidades irrelevantes del terreno (ruido geológico). [4]

En ciertos casos, el electrodo “ B ” se lleva a gran distancia de los demás, de modo que no influya sobre el valor de “ ΔV ” observado. Se tiene entonces el dispositivo denominado *Schlumberger asimétrico*, o *semi-Schlumberger*.

En la siguiente figura (2.5) se pueden apreciar las posibles variantes al método inicial planteado por Wenner :

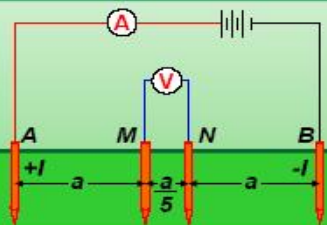
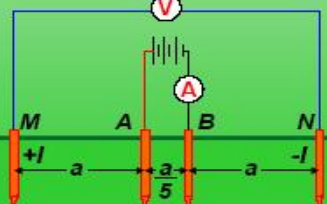
Disposición de los Electrodo.	Coeficiente del Dispositivo	$a > 20\rho$
	$\rho = \frac{4\pi R a}{\left[\frac{1}{3} + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4\rho^2}} - \frac{2a}{\sqrt{\frac{36}{25}a^2 + 4\rho^2}} \right]}$	$\rho = 6\pi a R$
	$\rho = \frac{4\pi R a}{\left[\frac{1}{3} + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4\rho^2}} - \frac{2a}{\sqrt{\frac{36}{25}a^2 + 4\rho^2}} \right]}$	$\rho = 6\pi a R$

Figura 2.5 Variantes del dispositivo de Schlumberger.

2.3.3 Dispositivo polo-dipolo.

En este dispositivo el electrodo “B” se lleva a una gran distancia (teóricamente en el infinito) de los otros tres (Figura 2.6)

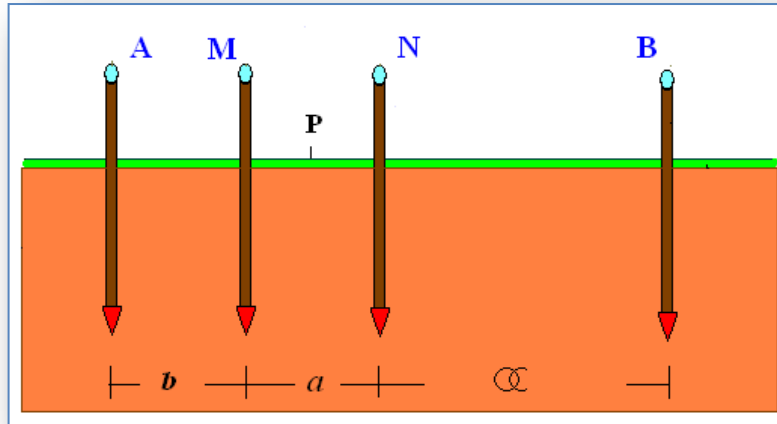


Figura 2.6 Dispositivo polo-dipolo

El factor geométrico del dispositivo en este caso es:

$$g = 2\pi \cdot \frac{b \cdot (b + a)}{a} \quad (2.14)$$

Cuando “ $a \ll b$ ” este dispositivo es equivalente al *semi-Schlumberger*. Una variación del dispositivo *polo-dipolo* se obtiene moviendo uno de los electrodos de potencial, por ejemplo “N”, a un punto distante (teóricamente al infinito). En este caso el factor geométrico es:

$$K = 2\pi b \quad (2.15)$$

Que coincide con la expresión del dispositivo *Wenner*, por lo que también recibe el nombre de dispositivo *half-Wenner*. [8].

2.3.4 Dispositivo doble dipolo.

En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea en el orden “ABMN” formando así un doble dipolo (Figura 2.7). En América del Norte este dispositivo se

denomina “ na ” veces *dispositivo dipolo-dipolo*. Realmente el dispositivo *doble dipolo* tiene diversas variantes (Orellana [7]), pero en este trabajo solo se utilizará la que se ha descrito.

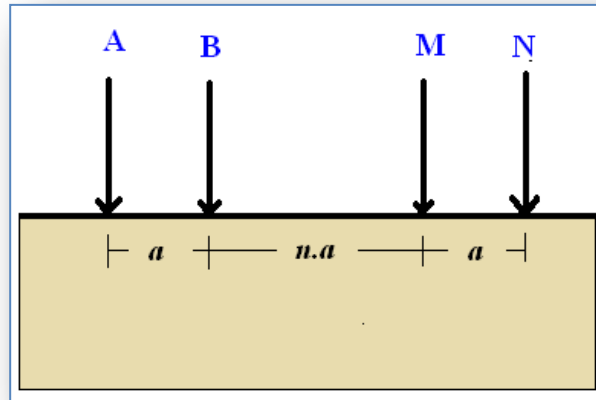


Figura 2.7 Dispositivo doble dipolo

El factor geométrico del dispositivo es en este caso:

$$g = -\pi \cdot n(n+1) \cdot (n+2)a \quad (2.16)$$

Este dispositivo se implementa normalmente con “ $n \gg 1$ ” (entonces “ AB ” y “ MN ” se comportan como un dipolo de corriente y de tensión respectivamente), aunque muchos autores utilizan este dispositivo incluso con “ $n = 1$ ”. El factor geométrico cuando tiende a “ $n \gg 1$ ” se puede expresar como:

$$g = -\pi \cdot n^3 \cdot a \quad (2.17)$$

El inconveniente es que el campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y tensión, por lo que necesita detectores más sensibles que los otros dispositivos.

2.3.5 Dispositivos Wenner α , β .

La Figura 2.8 muestra la disposición de electrodos en los dispositivos *Wenner* “ a ” y “ b ”, donde “ m ” es un número real positivo [9]. Un caso particular del dispositivo *a-Wenner* son los dispositivos *Wenner* ($m = 1$) y *Schlumberger* ($m \ll 1$). El dispositivo doble dipolo es un caso particular del *b-Wenner* cuando “ $m \gg 1$ ”.

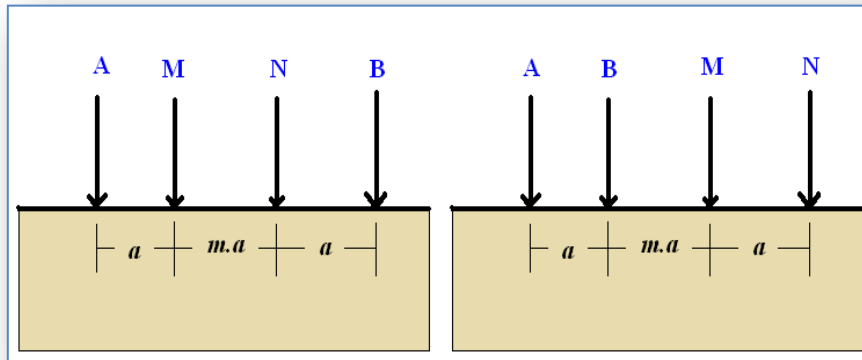


Figura 2.8 Dispositivos a -Wenner (izquierda) y b -Wenner (derecha) [4].

• 2.4 TIPOS DE PROSPECCIONES GEOELÉCTRICAS.

La finalidad de una prospección geoelectrica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos inmersos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie. Mediante la prospección geoelectrica conseguimos trazar una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que nos darán información sobre las estructuras que subyacen en él. Las prospecciones geoelectricas que se realizan se dividen generalmente en dos tipos:

- Sondeo eléctrico vertical (SEV).
- Calicatas eléctricas (C.E).

2.4.1. Sondeo eléctrico vertical.

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado (Figura 2.9).

Donde “ ρ_1 ”, “ ρ_2 ” corresponde a la resistividad de cada estrato o capa.

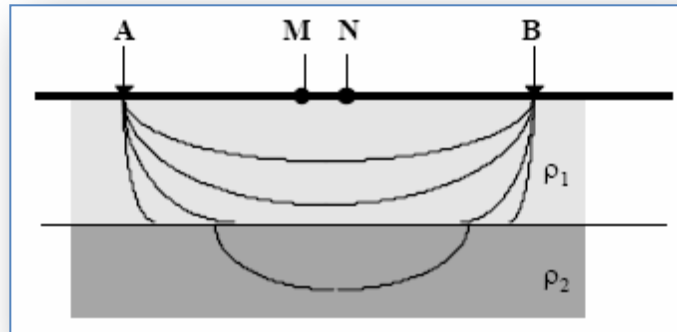


Figura 2.9 Principio del SEV. a medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas [4]

“La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores “AB”. Si la distancia entre los electrodos “AB” aumenta, la corriente circula a mayor profundidad, pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad “AB/2” y el 70.6% por encima de una profundidad “AB”. Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca. Podría pensarse que la *penetración* es proporcional a “AB”. Sin embargo, esto no es cierto en general puesto que lo dicho sólo es válido para un subsuelo homogéneo” [7].

Durante mucho tiempo, en prospección geoelectrica en corriente continua, la profundidad de investigación ha sido considerada sinónimo de la profundidad de penetración de la corriente. Sin embargo, el efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que la atraviesa [9]. Se define como “*La profundidad de investigación característica*” como la profundidad a la que una capa delgada de terreno (paralela a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno. Los autores indican que la profundidad de investigación viene determinada por la posición de los electrodos inyectores y detectores, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Esto queda claro con un ejemplo: si se intercambian entre sí las posiciones de los electrodos de potencial con los de corriente, la distribución de las líneas de corriente cambia. Sin embargo, en virtud del principio de reciprocidad, la resistividad aparente y por tanto la profundidad de investigación no cambia. Definiendo “L” como la distancia entre los dos electrodos extremos (sin considerar los situados en el infinito), los mismos autores determinan la profundidad de investigación de diversos dispositivos electródicos en un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de “0,35.L”, para Schlumberger de “0,125.L” y para Wenner de “0,11.L”. [4]

Edwards (1977) [10] sugiere que un valor más útil puede ser la profundidad a la cual la mitad de la señal medida en la superficie es debida a la porción de suelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal a la porción de suelo inferior. Barker (1989) la define como la “*Profundidad de investigación efectiva*”, y muestra con ejemplos la mayor utilidad de ésta sobre la utilizada por Roy y Apparao (1971). Las profundidades de investigación efectiva para los dispositivos Wenner, Schlumberger y doble dipolo son respectivamente de “ $0,17L$ ”, “ $0,19L$ ” y “ $0,25L$ ” (para este último la profundidad de investigación característica es de $0,195L$), es decir ligeramente mayores que utilizando la definición de profundidad de investigación característica. [4]

Experimentalmente, a partir de los dispositivos vistos en el apartado 2.3, el SEV consiste en aumentar progresivamente la distancia entre los electrodos manteniendo un punto central fijo (punto de sondeo P). Ahora veremos cómo se aplica a los diferentes dispositivos.

2.4.1.1 Sondeo Wenner.

Dado el dispositivo Wenner AMNB con separación interelectródica “ a ”, el sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de “ a ” manteniendo un punto central fijo “ P ” (Figura 2.10).

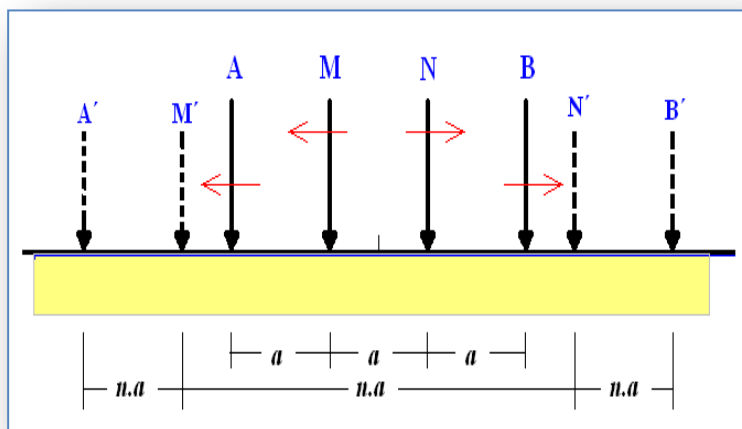


Figura 2.10 Sondeo Wenner. La distancia interelectródica pasa de a (AMNB) a “ na ” (A’M’N’B’) [4].

Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida, “ ρ_a ”, en $\Omega.m$, y en abscisas el valor de “ a ” en metros para cada paso.

2.4.1.2 Sondeo Schlumberger.

Dado el dispositivo Schlumberger “AMNB” con “ $AB \gg MN$ ”, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros “A” y “B” dejando los electrodos detectores “M” y “N” fijos en torno a un punto central fijo “P”.(Figura 2.12). La representación de este sondeo muestra en ordenadas “ ρ_a ” ($\Omega.m$) y en abscisas la distancia “ $AB/2$ ” m. En este sondeo el efecto de las heterogeneidades irrelevantes es menor pues sólo se mueven el par de electrodos inyectoros “A” y “B”. [4]

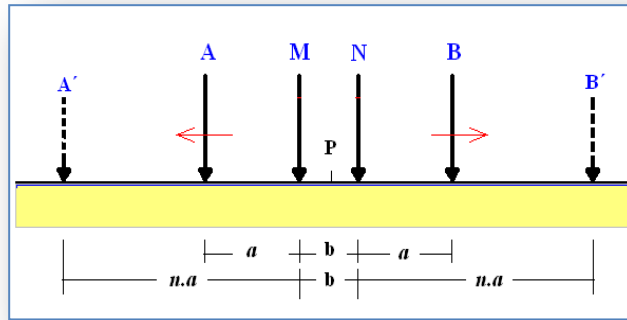


Figura 2.11 Sondeo Schlumberger. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos. [4]

2.4.1.3 Sondeo bipolar.

Dado el dispositivo doble dipolo “ABMN”, el sondeo consiste en la separación creciente de los centros de los dipolos respecto a un punto fijo origen “P” (Figura 2.12). La representación de este sondeo muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida “ ρ_a ” ($\Omega.m$) y en abscisas la separación de los centros de los dipolos en metros.

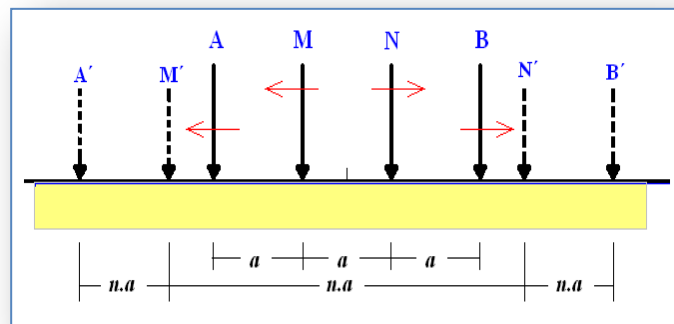


Figura 2.12 Sondeo dipolar. Los dipolos se mantienen, aumentando la separación entre ellos. [4]

- ***Efectos laterales en el SEV y ambigüedades en su interpretación***

Si el dispositivo electródico está próximo a un contacto vertical, las líneas de corriente serán distorsionadas por lo que " ΔV_{MN} " se verá afectado por el otro medio, tanto más cuanto mayor sea la separación de los electrodos "AB". Por lo tanto, la medida de la resistividad aparente en un SEV está influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Esto implica que para distancias "AB" grandes no se sabrá si la resistividad aparente es debida a cambios de estructuras en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de resistividades. Orellana [7].

Puede ocurrir que las curvas de resistividad aparente para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanece constante, lo que provoca una ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y su resistividad.

- ***Aplicaciones:***

El sondeo eléctrico vertical (SEV) es aplicable cuando el objetivo tiene una posición horizontal y una extensión mayor que su profundidad. Tal es el caso del estudio de capas tectónicas, hidrológicas, etc. También es adecuado para trabajar a poca profundidad sobre topografías suaves como complemento de las calicatas eléctricas, con el objetivo de decidir la profundidad a la cual realizar el perfil de resistividades, como ocurre por ejemplo en arqueología. El SEV no es adecuado para contactos verticales, fallas, diques, etc. [4]

Comentarios sobre la reseña bibliográfica de las metodologías de exploración geoelectrica implementadas.

Como se puede ver en la literatura revisada en este capítulo, la obtención de los parámetros eléctricos del terreno, por medio de la inyección de una corriente eléctrica a través de electrodos de prueba, dispuestos de una manera geométrica (de allí su nombre de acuerdo a cada autor), muestra claramente que las ecuaciones que se obtuvieron dependen directamente del arreglo geométrico de los electrodos y de las características de éstos (diámetro y longitud). En ninguno de los documentos se muestra una relación entre los valores obtenidos de los parámetros eléctricos del terreno, con la frecuencia de la corriente eléctrica inyectada al suelo, esto representa una limitación de esta metodología.

La resistividad del suelo varía dependiendo de su composición y de algunas condiciones físicas. Sus valores se encuentran desde unos pocos hasta millones de ohmios metro. Los suelos orgánicos suelen tener bajos valores; y las rocas altos valores, pero si queda claro es que la resistividad del suelo es afectada por numerosos factores y entre los que principalmente lo hacen están [11], [12]:

- El tipo de suelo;
- Composición química de las sales disueltas en el agua contenida;
- Grado de humedad; contenido de agua;
- Compactación;
- Tamaño y distribución del grano del terreno;
- Temperatura.

Si se revisa como la humedad tiene una fuerte influencia en el valor de la resistividad, se debe a la cantidad de agua inmersa entre los micro-espacios de los granos del suelo y al hecho que también existen sales disueltas en ella, esto da lugar a que la conducción de la corriente en el suelo sea esencialmente electrolítica.

El suelo es un material bastante heterogéneo, esto hace que su caracterización no sea tan sencilla. En general la información necesaria para el manejo de los sistemas de puesta a tierra, se prefiere de las mediciones de campo a las de muestras, por la dificultad de reproducir en un laboratorio las condiciones reales del sitio donde se desarrollará la instalación.

“En el caso de sistemas electrotécnicos de energía y/o potencia eléctrica, tanto de corriente continua como de corriente alterna industrial (50-60Hz), en virtud de que en la electrodinámica se demuestra que el análisis estacionario es prácticamente equivalente al análisis casi estacionario dentro del rango de las relativamente bajas frecuencias (6-60Hz); por ello, en la práctica se permite aplicar los resultados del análisis estacionario de electrodos tanto en instalaciones energéticas de corriente continua como de corriente alterna industrial”[1].

“La variación con la frecuencia no se puede perder de vista al pasar del análisis de fenómenos a frecuencia industrial (y a la cual se realizan las mediciones de campo), como las fallas fase-tierra, a fenómenos rápidos como las descargas atmosféricas, que involucran frecuencias hasta del orden de los MHz” [12].

“Finalmente se puede concluir que entre los métodos ilustrados en la reseñas de la literatura consultada, el método de Wenner tiene grandes ventajas con respecto a otros usados de manera general, su aplicabilidad está limitada también por la potencia del instrumento, la cual determinará la capacidad de inyección de corriente y de la medición de la tensión; aunque para las separaciones de interés en el área de diseño de puestas a tierra, los equipos ofrecidos por el mercado no presentan problemas” [12].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CAPÍTULO 2

- [1] de la Vega, Miguel O. “Ingeniería de puesta a tierra. Colección de textos politécnicos” – Limusa – 1998.
- [2] Ollendorf, F. Erdstroeme , (Corrientes telúricas), “Birkhauser Verlag”, basel u Stuttgart. 1969
- [3] Bunge, M. “La Investigación Científica”. Editorial Ariel, 1969.
- [4] Cassulla, M. F. “Tesis doctoral presentada en la Universitat Politècnica de Catalunya para la obtención del título de doctor”, Barcelona 1999.
- [5] E. MSc. JOHNY H. MONTAÑA C. “Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de Doctor en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia facultad de ingeniería Bogotá”, abril de 2006.
- [6] Dobrin and Savit, 1988. “Introduction to Geophysical Prospecting”, 4th Edition, McGraw-Hill.
- [7] ORELLANA, E. 1982, “Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua”.2ª ed. Madrid: Paraninfo.Vol 1.
- [8] Telford, W.M., L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, 1990. “Applied Geophysics” (2nd Edition), Cambridge.
- [9] Roy A. y Apparao A(1971), “Depth of investigation in direct current Methods”, Geophysic 36, 943-959
- [10] Edwards, L.S., 1977. “A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. Geophysics”, 42, 1020-1036.
- [11] Tagg, G.F. “Earth Resistances”, 1964, London, George Newnes Limited.
- [12] Moreno G.,Valencia J.,Cardenas C.,Villa W., “Fundamentos e Ingeniería de las puestas a tierra respuestas ante fallas eléctricas y rayos”, editorial Universidad de Antioquia, isbn:978-958-714-057-6, 2007

CAPÍTULO 3

MODELOS PARA INTERPRETAR EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO.

Para realizar un análisis del comportamiento transitorio de un sistema de puesta a tierra se hace necesario obtener los valores de los parámetros del terreno donde se proyecta construirlo. Dichos valores son la resistividad “ ρ ”, permitividad “ ϵ ” y permeabilidad “ μ ”, los cuales son necesarios y decisivos para realizar dicho análisis, puesto que permite el cálculo de los parámetros eléctricos concentrado de la teoría de circuitos eléctricos ($R(\rho)$, $L(\mu)$, $C(\epsilon)$).

Al revisar alguna de la literatura disponible, se encuentra inicialmente una clasificación del terreno de acuerdo al arreglo geométrico de los elementos con que se proyecta hacer la medida, sin perder de vista la cantidad de agua contenida en el, para lo cual se presentan valores constantes para la resistividad y la permitividad [5][6][7]. Se destacan algunos trabajos con pruebas experimentales, que tienen como propósito obtener los valores de estos parámetros, teniendo en cuenta la frecuencia de la señal de la fuente empleada para la prueba [8][9][10]. Esta dependencia de los valores obtenidos respecto a la frecuencia, se muestran a través de tablas, en otros casos son vinculadas a ecuaciones que hacen una buena aproximación dependiendo del valor de la resistividad medida a una frecuencia específica (100 Hz)⁶, tanto para la misma resistividad como para la permitividad a otras frecuencias.

Es importante aclarar que, en los trabajos presentados en la literatura mencionada, no se considera ninguna variación de las condiciones del terreno en cualquier parte del espacio que lo contiene, es decir el terreno se considera homogéneo.

A continuación, se presentan los modelos de los parámetros eléctricos del suelo, con el fin de analizar aspectos determinantes para su medida.

- **3.1 MODELO DEL TERRENO INVARIANTE CON LA FRECUENCIA.**

De acuerdo a la literatura que se ha consultado, se estableció que los parámetros eléctricos del suelo, que cambian de acuerdo al tipo de terreno y a la cantidad de agua contenido en el, son la resistividad y la permitividad.

⁶ Según la IEC 6100-4: Define que señales iguales o menores a 9 kHz son de baja frecuencia.

Los métodos de mayor uso son los de Wenner y Schlumberger, los cuales consisten en inyectar una señal eléctrica al terreno, por medio de electrodos auxiliares dispuestos en el terreno en un arreglo geométrico, y de acuerdo a la corriente inyectada y la tensión medida sobre el terreno, se calcula la resistencia aparente del medio, con este valor calculado se puede obtener el valor de la resistividad del suelo. La mayoría de los equipos utilizados para realizar este tipo de medida, utilizan señales de prueba inferiores a 9 kHz⁷ o incluso menores a 3kHz.

Al revisar algunas fuentes bibliográficas en busca de los valores típicos para la resistividad de un terreno específico, se encuentra que la mayoría de ellas no coinciden en los valores, se asume que las condiciones de las pruebas son distintas para cada investigador.

Naturaleza terreno	Resistividad en Ω. m
Terrenos pantanosos	± 3 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena arcillosas	50 a 500
Arena silice	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 5000
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1500 a 10000
Granito y gres muy alterado	100 a 600

Tabla No 3.1 Resistividad de varios suelos [7]

⁷ Según la IEC 6100-4: Define que señales iguales o menores a 9 kHz son de baja frecuencia.

Es importante resaltar que ninguna de las fuentes revela a que frecuencia se tomaron estos valores para los distintos terrenos que enumeran en sus tablas.

NATURALEZA DEL TERRENO	Resistividad en $\Omega - m$
Terrenos Pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	50 a 100
Marga y Arcillas Compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena Arcillosa	50 a 500
Arena Silíceo	200 a 3000
Suelo Pedregoso Cubierto de Césped	300 a 500
Suelo Pedregoso Desnudo	1,500 a 3,000
Calizas Blandas	100 a 300
Calizas Compactas	1,000 a 5,000
Calizas Agrietadas	500 a 1,000
Pizarras	50 a 300
Granito y Gres procedentes de Alteraciones	1,500 a 10,000
Roca Ígnea	5,000 a 15,000

Tabla No 3.2 Resistividad de varios suelos [11]

Tipo de terreno	Resistividad del terreno ρ [Ωm]	
	Margen de valores	Valor medio
Terreno pantanoso	2 - 50	30
Barro mezclado con paja	2 - 200	40
Terreno fangoso y arcilloso, humus	20 - 260	100
Arena y terreno arenoso	50 - 3.000	200 (húmedo)
Turba	> 1.200	200
Grava (húmeda)	50 - 3.000	1.000 (húmedo)
Terreno pedregoso y rocoso	100 - 8.000	2.000
Hormigón: 1 parte de cemento + 3 partes de arena	50 - 300	150
1 parte de cemento + 5 partes de grava	100 - 8.000	400

Tabla No 3.3 Resistividad de varios suelos. [12]

• 3.2 MODELO DEL TERRENO VARIANTE CON LA FRECUENCIA.

En este capítulo se pretende mostrar como la permitividad (ϵ) y la resistividad (ρ) del terreno varía con la frecuencia de la señal de prueba y el contenido de agua, para esto se tomarán los resultados de laboratorio obtenidos por algunos investigadores para corroborar dicha premisa.

La forma de obtener las variaciones de estos parámetros eléctricos del suelo, consiste en tomar una probeta conteniendo material de estudio, con contenidos de agua que podían variar desde el 2.5% al 15%, y aplicarle una señal de corriente, cuya frecuencia se hizo variar entre 20 Hz y 2 Mhz, [8]. Como la geometría de la probeta es conocida, se conoce de entonces su configuración, permitiendo conocer los valores de los parámetros bajo estudio, para cada frecuencia de la señal de prueba.

El tipo de señal que se le aplicó a las muestras, eran señales sinusoidales de baja amplitud, y la prueba consistía en obtener la corriente y la tensión directamente de la muestra o conectar la muestra a un puente de valor nulo y obtener los valores de este [5].

Los resultados presentados por Visacro en su documento “Modelagen de aterramentos eletricos” [8], muestra variaciones muy significativas de la permitividad relativa (ϵ_r), de 10^5 para una frecuencia de la señal de prueba de 10 Hz y de 10^1 , para una frecuencia de 1MHz. Por otro lado, la resistividad también presenta variaciones que van desde 10^4 hasta 10^2 , para el mismo rango de frecuencias de las señales de prueba. Es importante resaltar que el rango de frecuencias de 0 a 1 MHz comprende al espectro de frecuencias de una descarga eléctrica atmosférica.

Debido a los altos valores encontrados para la permitividad (ϵ_r) respecto a frecuencias menores de 10 kHz, los autores de algunas investigaciones, tales como Visacro [8] y Cunningham[10], analizan estos resultados con el fin de darle una interpretación razonable a estos altos datos, mencionan en sus estudios que estos valores tan altos se deben a un fenómeno llamado polarización iónica, la cual se presenta en la superficie de los electrodos de prueba, cuando se realizan las medidas; esta polarización requiere de energía adicional en forma de campo eléctrico, que puede verse reflejado como un aumento de la impedancia medida de la muestra y por lo tanto esto determina un aumento en los valores de la resistividad (ρ) y de la permitividad (ϵ_r). También encontraron en sus estudios que este fenómeno se ve afectado notoriamente para frecuencias que sobrepasan los 10kHz, esto se debe a que la velocidad de respuesta de la polarización en los electrodos es pobre y para señales oscilatorias con frecuencias elevadas el fenómeno es casi imperceptible [10].

Para dar una idea del problema que ocasiona el fenómeno de polarización, los investigadores en sus escritos muestran que para una frecuencia de 100 Hz de la señal de prueba inyectada a la muestra, el valor de la permitividad es 10^1 veces mayor y el valor de

la resistividad duplica el valor real. Con el fin de contrarrestar dicho fenómeno, los investigadores proponen alternativas tales como las del estudio de Cunningham [10], esta metodología propone utilizar materiales muy particulares para los electrodos (tales como cobre) y además el uso de compuesto químicos en contacto con la superficie de los electrodos, que impidan el desplazamiento de iones. Este último procedimiento propuesto era impráctico, por sobre todo por su dificultad para implementarlo. Por otro lado, Visacro [8] en sus investigaciones propone realizar dichas mediciones, de manera indirecta y esta metodología consiste en medir el aumento que tenga la impedancia de la muestra debido al fenómeno de polarización. También se pudo establecer en sus pruebas de laboratorio que el fenómeno se acentuaba para las probetas de medición con electrodos cilíndricos, cuando el electrodo interno tenía un radio pequeño y también cuando las distancias que separaban los electrodos era pequeña.

En la revisión de los datos obtenidos por Visacro [8], este realizó cálculos de la impedancia de puesta a tierra para un electrodo vertical de 10 m de largo, teniendo en cuenta que la resistividad y la permitividad relativa varían con la frecuencia de la señal de prueba. De acuerdo con los resultados que obtuvo, lo llevo a concluir que al no tener en cuenta el fenómeno de polarización, los errores cometidos podían estar alrededor del 13%, lo que implica un sobredimensionamiento del sistema de puesta a tierra. Siendo este error según los investigadores como Visacro tolerable al momento de evaluar las puestas a tierra de un sistema eléctrico.

De acuerdo a las medidas y los resultados que dieron lugar en las pruebas de laboratorio, se proponen las siguientes ecuaciones tanto para la permitividad como para la resistividad, las cuales dependen de la frecuencia a la que se desea reevaluar estos parámetros, teniendo como referencia el valor de la resistividad medida a una frecuencia base de 100Hz:

$$\rho(f) = \rho_{(100 \text{ Hz})} \cdot \left(\frac{100}{f}\right)^{0.072} [\Omega \cdot m] \quad 3.15$$

$$\varepsilon_r(f) = 2.34 \times 10^6 \cdot \rho_{100\text{Hz}}^{-0.535} \quad 3.16$$

Las ecuaciones 3.15 y 3.16 solo presentan variación con la frecuencia; se asume que el valor de resistividad a 100 Hz tiene en cuenta implícitamente el tipo de terreno y el valor de humedad del mismo. [5]

Otros trabajos consultados que se relacionan con investigaciones sobre el modelamiento del suelo son los de Portela [9][13][14][15], el cual hace un aporte del comportamiento electromagnético del suelo.

Uno de los aspectos de mayor relevancia en los estudios y simulación de los sistemas de puesta a tierra, es el modelo circuital apropiado del terreno.

A excepción de los altos campos eléctricos que generan ionización en el suelo, el comportamiento electromagnético del suelo es esencialmente lineal, siempre y cuando la conductividad eléctrica " σ " y la permitividad eléctrica " ε " sean fuertemente dependiente de la frecuencia. La permeabilidad magnética " μ " es en general casi igual a la permeabilidad magnética del vacío " μ_0 ".

Para transitorios rápidos como los asociados con descargas atmosféricas (rayos), el comportamiento del suelo es importante en un amplio rango de frecuencias (0 a 2 MHz) [9].

Uno de los grandes aportes de Portela es la metodología desarrollada para medir los parámetros del suelo en función de la frecuencia, puesto que la gran dificultad que se presenta en la toma de la muestra de suelo, hace de esta práctica algo imposible de hacer sin la experiencia y metodología apropiada.

La metodología desarrollada por Portela establece varios procedimientos de medición y tiene su fundamento en el alto número de ensayos realizados en muchísimos suelos con grandes diferencias geológicas, además de las mediciones sistemáticas de campo y laboratorio, variando el contenido de agua de las muestras. Lo más importante de dicha metodología es la obtención de un modelo físicamente coherente con el comportamiento electromagnético del suelo. Como ejemplo del tratamiento que se le debe dar a la toma de las muestras y de los aspectos que se debe enfrentar en la medición, se hace necesario y transcendental que se esté seguro de mantener la estructura del suelo y la humedad en la muestra, con el fin de minimizar los efectos heterogeneidad del suelo local.

La metodología comprende tres grupos de suelos que implican tres procedimientos:

- Para suelos compactos (que incluye las arcillas).
- Para suelos pulverulentos (incluye la arena).
- Para rocas.

La descripción básica de estos procedimientos se presentan en los siguientes documentos [14][15], los cuales han sido aplicados con excelentes resultados, a un gran número de sitios y tipos de suelos.

Una de las grandes dificultades que presenta esta metodología radica en que las mediciones de campo de suelos reales tienen una dispersión inherente, por lo tanto, hacer una adaptación puramente matemática como la de Fourier, puede llevar a modelos físicos

incompatibles. Esto exige contar con un buen criterio de validación de los modelos del suelo, que permita cubrir las características reales de este [9].

Los diferentes modelos eléctricos del suelo presentados por Portela en su documento “Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior” [15], tiene su justificación basándose en los siguientes puntos:

- Cubrir un gran número de parámetros del suelo con las medidas que se realicen en campo, las cuales ofrezcan buena precisión y confianza.
- Satisfacer las condiciones de coherencia.

Donde los parámetros eléctricos del suelo (σ , ϵ) se determinan en función de la frecuencia y en particular para un grupo de modelos, los cuales están ligados por los tipos de suelos definidos antes en los procedimientos de medida [15].

Plantea que para una variación lenta de las entidades electromagnéticas se puede presentar un tipo de comportamiento de histéresis y finalmente el investigador Portela [9] establece que para corriente directa o para variaciones muy lentas de las entidades electromagnéticas, se presenta el fenómeno de migración de humedad, incluyendo electroósmosis y efectos de heterogeneidad de la temperatura, los cuales no pueden ser tratados únicamente con los parámetros del suelo local.

Para los transitorios debido a un suicheo en una línea, el rango importante de la frecuencia está por encima de los 10 kHz, y se demuestra que el modo homopolar tiene algunas diferencias debido a la representación del suelo que se utiliza. Para operaciones rápidas de protección y también la detección de fallas, el rango importante de la frecuencia está por encima de los 100 kHz, y los resultados aplicados al modelo del suelo son muy diferentes a los parámetros de línea [15].

Para transitorios rápidos, normalmente asociados a rayos, el comportamiento electromagnético del suelo es importante en un amplio rango de frecuencias, típicamente desde 0 a 2 MHz. En esta gama de frecuencias, además de los fenómenos lentos y los fenómenos del tipo histéresis, comentado anteriormente, el tipo comportamiento del suelo suele ser de un cambio de fase mínima [16].

- **3.3 IMPEDANCIA DEL ELECTRODO - TENIENDO EN CUENTA EL ARREGLO GEOMÉTRICO.**

Para la medida de los parámetros eléctricos del suelo con métodos eléctricos artificiales, es necesario la inyección de una corriente eléctrica artificial, lo que requiere de elementos que permitan conducir la corriente hacia la tierra, de tal forma que al atravesarla conforme un circuito eléctrico con la fuente artificial, parte del circuito eléctrico que se constituye, es el terreno que se desea estudiar, por el que circulara dicha corriente, generando una tensión en el suelo, la cual se desea detectar por medio de elementos interpuesto de manera apropiada y de acuerdo a un arreglo geométrico de estos elementos (Método de Wenner) se puede llegar a medir uno de los parámetros eléctricos del suelo, fundamental para el diseño de los sistema de puesta a tierra de sistemas eléctricos.

Los elementos auxiliares que se requieren para inyectar la corriente al terreno y detectar la tensión que genera esta al atravesar el terreno son generalmente electrodos cilíndricos metálicos. Ahora bien es importante caracterizar eléctricamente las propiedades que poseen estos elementos (electrodos) frente algunas condiciones que se pueden dar de forma autónoma o que son influenciadas por fenómenos externos, esto permite optar criterios de diseño integral del equipo que conforma el sistema de medida de uno de los parámetros eléctricos del suelo, como es la resistividad.

La impedancia de electrodo se puede modelar como la suma de una resistencia de contacto y una impedancia electroquímica. La resistencia de contacto viene dada por la dificultad que opone el terreno al paso de corriente en las proximidades del electrodo.

Consideremos un electrodo puntual en la superficie de un terreno homogéneo de resistividad ρ (Figura 3.1).

El potencial V_1 a la distancia r_1 del electrodo será [1],

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi r_1} \quad 3.1$$

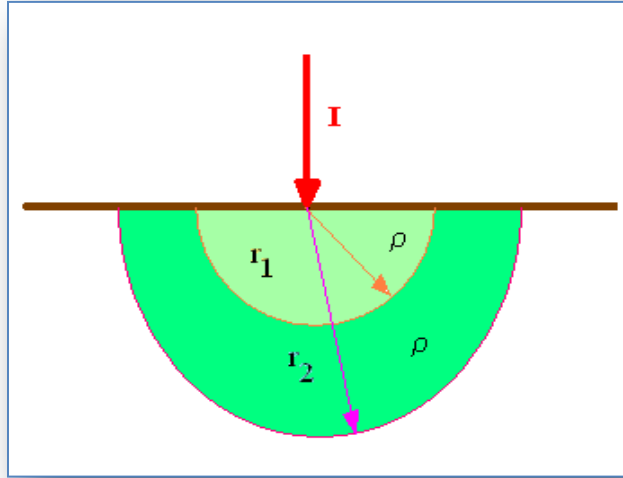


Figura 3.1 Electrodo puntual de corriente en la superficie de un terreno.

Donde:

“ ρ ”: La resistividad del suelo.

“ I ”: La corriente inyectada al suelo.

“ r_1 ”: Distancia a la que se calcula el potencial.

De igual forma para la distancia “ r_2 ” el potencial valdrá,

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi r_2} \quad 3.2$$

La resistencia de la capa semiesférica comprendida entre las distancias “ r_1 ” y “ r_2 ”, según la ley de Ohm será:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad 3.3$$

Si se tiene que las distancias “ r_1 ” y “ r_2 ” difieren entre sí una cantidad pequeña “ dr ”:

$$R \cong \frac{\rho}{2\pi r^2} dr \quad 3.4$$

La corriente “ I ” va atravesando sucesivamente capas semiesféricas cuyas resistencias respectivas decrecen con el cuadrado de la distancia. Por lo tanto, las capas de mayor radio

influyen poco en la resistencia de contacto, concentrándose ésta en la inmediata proximidad del electrodo.

En el caso de un electrodo semiesférico, este electrodo tiene la forma geométrica de una cascara esférica, el cual se introduce en el terreno con su diámetro ecuatorial contra la atmosfera, tal como se muestra en la gráfica 3.2:

Dónde: “ r_o ”: radio del electrodo semiesférico.
“ R_c ”: resistencia de contacto del electrodo.
“ γ_a ”: permitividad del medio ambiente.
“ γ_t ”: permitividad del terreno.

La resistencia de contacto del electrodo se debe asimilar como aquella que está comprendida entre la superficie del electrodo y el infinito,

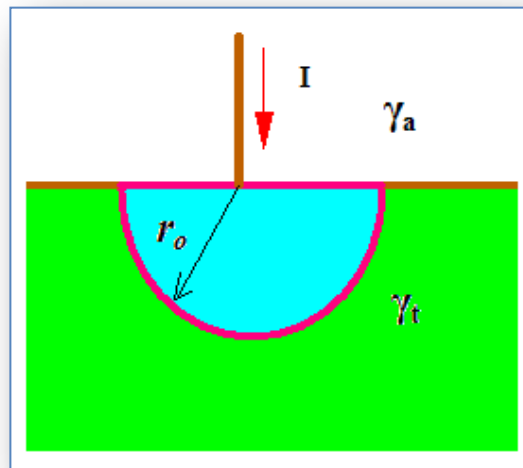


Figura 3.2 Electrodo semiesférico dentro de la superficie de un terreno.

Las condiciones en las que se encuentra el electrodo, se ven claramente en la figura 3.2, donde el electrodo está en contacto con dos medios de diferente conductividad (la de la atmosfera “ γ_a ” y la del terreno “ γ_t ”)[3].

Aplicando el método de las imágenes ⁸se puede calcular la función potencial del campo del electrodo semiesférico en la zona “ $r \geq r_o$ ” del suelo, así:

⁸ Método heurístico de J.J.Thomson - Método de la imagen reflejada.

$$V = \frac{1}{4.\pi.\gamma.r} \bar{J} \quad 3.5$$

Donde la corriente impresa “ $\bar{J} = 2I$ ” será irradiada a través de toda la superficie de la esfera (en dirección normal a su superficie) a partir del centro eléctrico, hacia el ahora ilimitado medio de conductividad homogénea “ γ_t ” (gracias al proceso de reflexión) [3].

Por lo tanto, sobre el electrodo mismo impera el potencial:

$$V_0 = \frac{1}{2.\pi.\gamma.r_0} . I \quad 3.6$$

Y puesto que “ $\varphi_0 = R_c J$ ” se tiene que la resistencia a la propagación del electrodo (o resistencia de contacto) se puede calcular como:

$$R_c = \frac{V}{J} = \frac{1}{2\pi\gamma r_0} = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad 3.7$$

Donde se tiene que la conductividad del suelo se puede expresar en función de la resistividad del suelo, “ $\rho = 1/\gamma$ ”. En la práctica geoelectrica se suelen usar electrodos del tipo varilla puntiaguda de material de acero o cobre. La resistencia de contacto de un electrodo cilíndrico es: [2]

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi l} . \ln \frac{2l}{r} \quad 3.8$$

Dónde: “ r ” : Radio del electrodo cilíndrico

“ l ” : Longitud del electrodo dentro del terreno.

“ ρ ”: Resistividad del terreno (se asume homogéneo)

Si se hace un breve análisis de la ecuación 3.8, se tiene que la resistencia de contacto disminuye al aumentar “ r ” y “ l ”, esto se traduce en un aumento de la superficie de contacto del electrodo tipo varilla con el terreno.

La impedancia electroquímica del electrodo mide la oposición al paso de corriente, que presenta la interfaz entre electrodo y electrolito (el terreno). La Figura 3.3 es un modelo simplificado que, además, incluye la resistencia de contacto y el potencial E generado en la interfaz electrodo-electrolito. “ C_s ” es la capacitancia de la superficie del electrodo, “ R_p ” es una resistencia de referencia.[2]

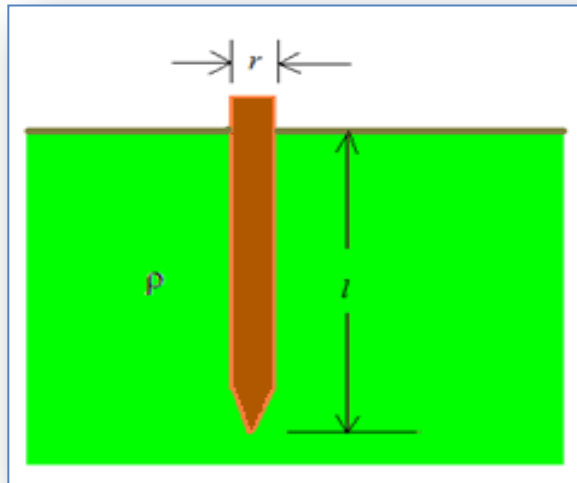


Figura 3.3 Electrodo cilíndrico dentro de la superficie de un terreno.

La impedancia equivalente se ha obtenido sin considerar el potencial “ E ”. A frecuencias altas el condensador “ C_s ” presenta baja impedancia (se asume como un corto), por lo tanto, la impedancia del electrodo será R_c .

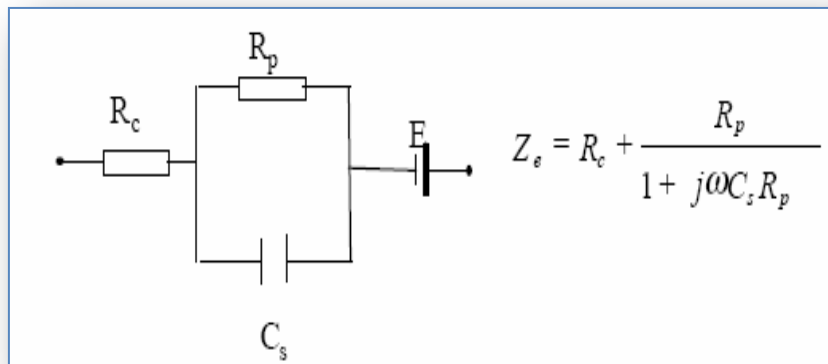


Figura 3.4 Modelo simplificado de la impedancia de electrodo [2].

Donde: “ R_c ”: resistencia de contacto del electrodo con el medio en el cual esta embebido.

“ E ”: potencial generado en la interfaz electrodo-electrolito.

“ C_s ”: capacitancia de la superficie del electrodo.

“ R_p ”: resistencia de referencia.

Una forma de calcular los parámetros en el modelo de impedancia de electrodo (Figura 3.4) es utilizar señales cuadradas y realizar medidas en el dominio temporal [2],[4]. La Figura 3.5 muestra el circuito equivalente de medida.

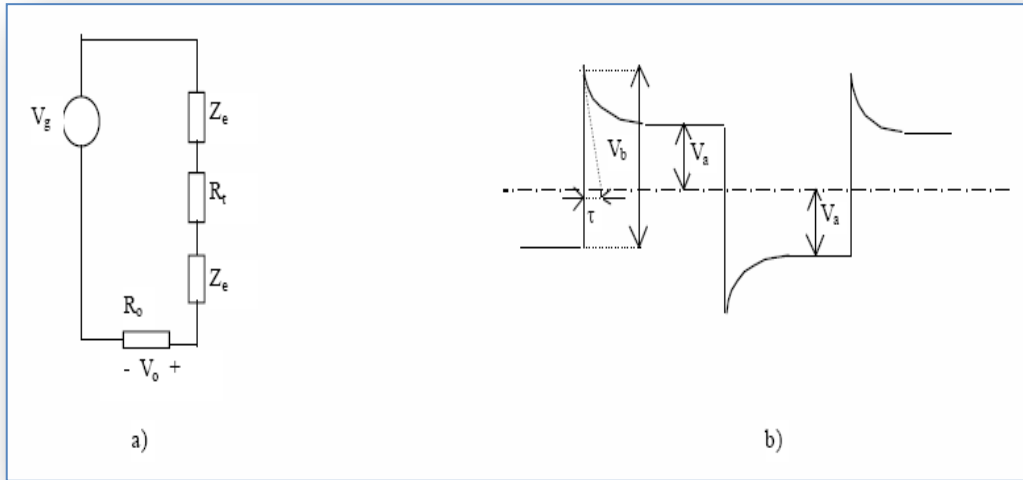


Figura 3.5 a) Circuito equivalente de medida de la impedancia de electrodo. b) Tensión medida en R_o . [4]

Dónde: “ Z_e ”: es la impedancia de electrodo.

“ R_t ”: la resistencia del terreno.

“ R_o ”: una resistencia de referencia de valor conocido.

“ V_g ”: una señal cuadrada de período “ T ” y valor de pico “ V_p ”.

Si utilizamos el modelo de la Figura 3.5 para “ Z_e ” y consideramos “ R_t ” mucho menor que la resistencia de contacto “ R_c ”, la tensión “ V_o ” en bornes de “ R_o ”, en el dominio de Laplace, es:

$$V_o(s) = \frac{R_o}{R_o + 2R_c} \frac{2R_c + R_o}{2(R_c + R_p) + R_o + sR_p(2R_c + R_o)C_1} V_g(s) \quad 3.11$$

La tensión cuadrada “ V_g ” se puede expresar en el dominio temporal como:

$$V_g(t) = V_p \left[u(t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n 2u(t - nT) \right] \quad 3.12$$

Donde “ $u(t)$ ” es la función escalón. Si “ R_o ” es mucho menor que la resistencia de contacto “ R_c ” la respuesta temporal de “ V_o ” queda:

$$V_o(t) = V_p \left[\frac{R_o}{2(R_c + R_p)} + \frac{R_o R_p}{2R_c(R_c + R_p)} e^{\frac{t}{(R_c + R_p)C_s}} \right] \left[u(t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n 2u(t - nt) \right] \quad 3.13$$

Si la constante de tiempo " $\tau = (R_c // R_p)C_s$ " es bastante menor que el período de la señal, las tensiones " V_a " y " V_b " en la Figura 1.3 son:

$$V_a = \frac{R_o}{2(R_c + R_p)} V_p \quad 3.14$$

$$V_b = \frac{R_o}{R_c} V_p \quad 3.15$$

$$\tau = (R_c \parallel R_p) \quad 3.16$$

Por tanto, conociendo " V_p ", " V_a ", " V_b ", " R_o " y " τ ", podemos determinar los parámetros de la impedancia de electrodo " R_c ", " R_p " y " C_s ".

"Con estos valores, a frecuencias superiores a 1 kHz la impedancia de electrodo es prácticamente resistiva del valor " R_c ".

La forma más usual de caracterizar la impedancia de electrodo es a partir de medidas a varias frecuencias.

"En la figura 3.6 se muestran el módulo y la fase de la impedancia de un par de electrodos adyacentes, medidos entre 10 Hz y 10 kHz con dos puntos por década. Las medidas se han realizado con el sistema PROGEO inyectando una señal de 2 Vpp.)"[4].

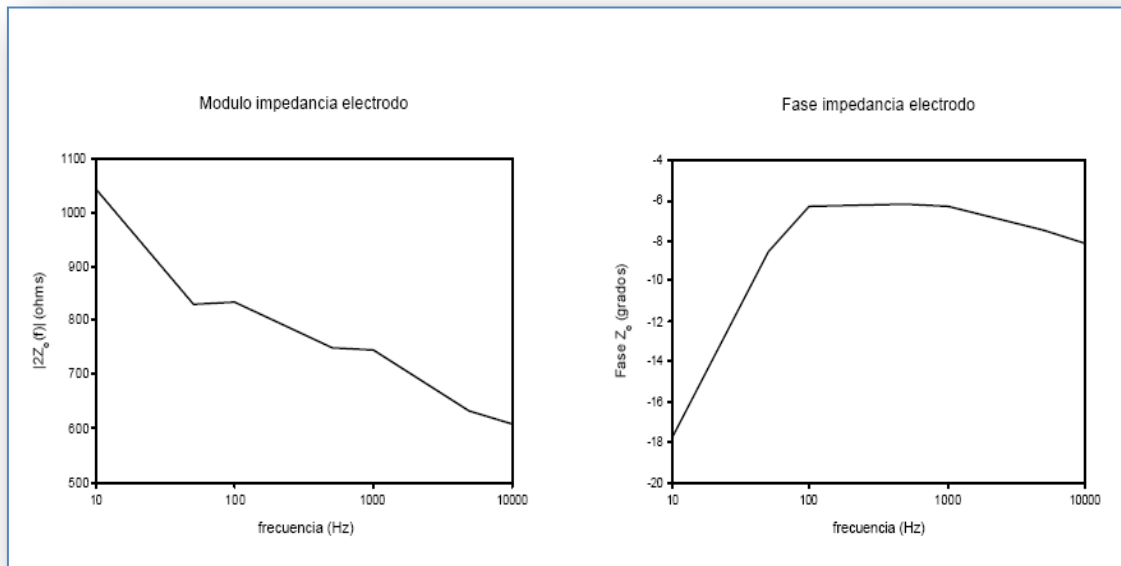


Figura 3.6 Impedancia de un par de electrodos adyacentes a diferentes frecuencias.

“Estas medidas no se ajustan al modelo encontrado inyectando una señal cuadrada. De hecho, la respuesta temporal a una onda cuadrada no responde del todo a una forma exponencial. La impedancia de electrodo tiene normalmente un comportamiento complejo y necesita de un modelo circuital más complicado, con componentes que varían con la frecuencia. Sin embargo, nuestro interés radica más bien en mostrar que la impedancia de electrodo decrece y es más resistiva a medida que la frecuencia aumenta, lo que queda patente a partir de los resultados anteriores (tanto utilizando señales cuadradas como senoidales)”[4].

“Si entre los electrodos de inyección A y B generamos una tensión de amplitud fija (senoidal o cuadrada) la corriente inyectada aumentará si la impedancia del electrodo disminuye. Un aumento de corriente provoca un aumento en la tensión diferencial medida entre los electrodos M y N, y por tanto una mejora en la relación señal/ruido (S/N) medida. Por lo tanto, para disminuir la impedancia de electrodo es conveniente clavar (o sumergir) los electrodos suficientemente, y trabajar a una frecuencia elevada (con lo que se reducen también los errores debidos a la interferencia de 50 Hz y a las corrientes telúricas). El límite superior de la frecuencia de trabajo vendrá limitado entre otros factores por la penetración nominal (apartado 4.2) y por el acoplamiento electromagnético entre el inyector y el detector (apartado 4.3.3).[4]

Con base en el esquema planteado por Wenner el investigador Cassulla [4], en su proyecto de investigación llega a varias conclusiones, las cuales se tomaran en cuenta para establecer algunas pautas en la metodología que se pretende plantear del diseño del telurómetro.

Es interesante ver otros enfoques para determinar los parámetros del suelo, y en especial el modelo circuital que se debe optar para interpretar con cierto grado de coherencia el comportamiento del terreno.

3.3.1 Circuito equivalente electrodo-electrolito.

Un circuito equivalente del electrodo-electrolito dado por Pollak [17] se muestra en la Fig. 3.7. La impedancia total se compone de la parte de interfaz, la parte de difusión y la parte de la resistencia interna, que están conectados en serie.

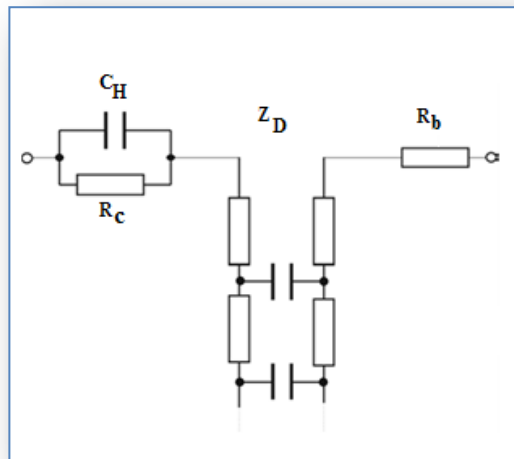


Figura 3.7 Circuito equivalente del electrodo-electrolito dado por Pollak [17]

• 3.4 ANÁLISIS DEL TEMA.

De acuerdo a la documentación consultada en este capítulo se puede ver claramente la influencia que tiene la frecuencia de la corriente inyectada, para caracterizar los parámetros eléctricos del suelo. Esta influencia incluso afecta los elementos del sistema de medida, por lo tanto, es determinante tener muy en cuenta los rangos de frecuencia que se estén manejando.

Se observa claramente que la resistividad del suelo, se ve afectada ampliamente cuando éste es atravesado por corrientes de diversas frecuencias, y los parámetros eléctricos varían notablemente. Esta conducta es importante de tener en cuenta a la hora de diseñar un

sistema de puesta a tierra, para distintos escenarios que son regidos por efectos naturales, tales como descargas atmosféricas, cargas electrostáticas, inducciones eléctricas, o por condiciones artificiales generadas por el hombre, producto de un corto circuito a baja frecuencia o sobretensiones transitorias producto de la manipulación de grandes cargas en un sistema eléctrico, las cuales activan sistemas de protección los cuales drenan estas anomalías hacia la tierra a través de los sistemas de puesta a tierra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS – CAPITULO 3

- [1] Ollendorf, F. Erdstroeme , (Corrientes telúricas), “Birkhauser Verlag”, basel u Stuttgart. 1969
- [2] Cobbold, R.S.C., 1974. Transducers for Boimedical Measurements: Principles and Applications. John Wiley&Sons.
- [3] de la Vega, Miguel O. “Ingeniería de puesta a tierra. Colección de textos politécnicos” – Limusa – 1998.
- [4] Cassulla, M. F. “Tesis doctoral presentada en la Universitat Politècnica de Catalunya para la obtención del título de doctor”, Barcelona 1999.
- [5] E. MSc. JOHNY H. MONTAÑA C. “Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de Doctor en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia facultad de ingeniería Bogotá”, abril de 2006.
- [6] D. Hristov L. Grcev. More accurate modelling of earthing systems transient behaviour. Compatibilite Electromagnetique, (S.25.B).
- [7] L. Grcev. Numerical analysis of the transient voltages near grounding systems. pages 105–110, Berlin-Germany, September 1992.
- [8] S. F. Visacro. Modelagem de Aterramentos Eletricos. Tese de doutorado, Coordenacao dos Programas de Pos-Graduacao da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Julio 1992.
- [9] C. M. Portela. Frequency and transient behavior of grounding systems i - physical and methodological aspect. pages 380–384, Austin , United States., August 1997.
- [10] D. Cunningham J. H. Scott, D. Carrol. “Dielectric constant and electric conductivity measurements of moist rock”: A new laboratory method. Journal of Geophysical Research, 72(20):5101– 5115, October 1967.
- [11] D. Cunningham J. H. Scott, D. Carrol. “Tomas de Tierra y Protecciones Contra Sobreteniones en Estaciones de Base”: Telergía, Energía en Telecomunicaciones. Pagina Web
- [12] Prof. Henryk Markiewicz&Dr Antoni Klajn “Puestas a tierra y EMC”, Wroclaw University of Technology, junio 2003.: Leonardo Power Quality Initiative.6.3.1
- [13] C. M. Portela. Influence of Earth Conductivity and Permittivity Frequency Dependence in Electromagnetic Transient Phenomena” – Comissao de implantacao do sistema de Controle do Espaco Aereo – CISCEA)Establishment
- [14] Portela, C. – Grounding Requirement to Assure People and Equipment Safety Against Lightning – proceedings IEEE 2000 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 969-974, August 2000, Washington DC, United States.
- [15] Portela, C. - Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior - Proceedings IEEE 1999. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - EMC Society, pp. 1004-1009, August 1999, United States.
- [16] C. Portela “Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - I Physical and Methodological Aspects”, Proceedings 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp 380-384, August 1997, United States.
- [17]. Pollak, V., 1974a. An equivalent diagram for the interface impedance of metal needle electrodes. Med. and Biolo.

CAPÍTULO 4

INTERPRETACIÓN DE LA RESISTIVIDAD MEDIANTE EL SONDEO ELÉCTRICO.

Las diversas técnicas documentadas en los capítulos 1-2 muestran la manera de medir la resistividad del suelo en un sitio específico. En algunas de estas técnicas se mide su inverso, la Conductividad. Algunas de estas técnicas plantean métodos más modernos y mucho más precisos, pero los sondeos eléctricos verticales (SEV) se siguen usando por su sencillez y lo relativamente económico, respecto al equipo que se utiliza.

En este capítulo se pretende mostrar la forma de manejar los datos que se toman en campo, con un fin específico interpretar la estratificación⁹ que pueda presentar el subsuelo de un terreno.

Ya se indicó que, si el suelo se compone de formaciones con diferentes resistividades, la medida que se realice de resistividad en un sitio del terreno, no corresponde a ninguna de ellas, sino al valor aparente del conjunto.

• 4.1 RESISTENCIA ELÉCTRICA.

En forma experimental se puede demostrar que la intensidad de corriente que atraviesa un cuerpo por unidad de área es lineal y proporcional al gradiente del potencial $(\Delta V/\Delta l)$. Por ende, para una sección cualquiera, se tiene que:

$$Intensidad = K.Sección.\frac{\Delta V}{\Delta l} \quad 4.1$$

Dónde: “C”: es la constante de proporcionalidad y corresponde a la conductividad del material.

“Sección”: es el área transversal del volumen del cuerpo bajo estudio.

⁹ Delimitar en varias capas con espesores y resistividades específicas el subsuelo

Por otra parte, la resistencia (R) que opone un cuerpo al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la longitud " L ", e inversamente proporcional a la sección transversal " S ". La constante de proporcionalidad lineal (ρ) es la resistividad, parámetro eléctrico y característica de propia de cada material.

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad 4.2$$

Se tiene que la conductividad " C " es el comportamiento inverso de la resistividad " ρ ", se puede reescribir la ecuación 4.2 como:

$$R = \frac{1}{C} \cdot \frac{L}{S} \quad 4.3$$

Ahora bien, si se despeja el valor de " C " de la ecuación 4.3 y se reemplaza en 4.1, se tiene en valor de la intensidad de corriente así:

$$\text{Intensidad de corriente} = \frac{\Delta V}{R} \quad 4.4$$

Se puede ver claramente que la ecuación 4.4 es una analogía con la Ley de Ohm.

La unidad de resistencia eléctrica es el Ohmio (Ω). La cual se define como la resistencia de un 1 ohmio que un cuerpo ofrece al ser sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio, estableciendo a través de él una intensidad de corriente de 1 amperio.

Si se revisa las unidades de la ecuación 4.2 se puede deducir el valor de las unidades de la resistividad:

$$R[\Omega] = \rho \frac{L[m]}{S[m^2]} \quad 4.5$$

La igualdad de la ecuación 4.2 representada en unidades en la ecuación 4.5, permite establecer que la resistividad debe tener como unidades [$\Omega.m$], para que la igualdad sea consistente.

Por tanto, se tiene que: [Ω] = [Ω]

$$R[\Omega] = \rho[\Omega.m] \cdot \frac{L[m]}{S[m^2]} \quad 4.6$$

- **4.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD EN UN PUNTO (RESISTIVIDAD APARENTE)**

Al introducir una corriente de valor “ I ” en el suelo por el punto “ A ” (ver figura 4.1), y mediante la ley de Ohm calculamos la resistencia “ R ”, que se opone al paso de esa corriente sobre un casquete semiesférico de radio “ r ” y de un espesor “ dr ”, para ello se puede usar la ecuación 4.2 y se tiene que [1]:

$$R = \rho \cdot \frac{\text{longitud}}{\text{área}} = \rho \cdot \frac{dr}{2\pi \cdot r^2} \quad 4.7$$

Al aplicar la expresión 4.4 se tiene:

$$-dv = R \cdot I \quad 4.8$$

Si se sustituye 4.7 en 4.8 el valor de la resistencia “ R ” se obtiene el valor de “ V ”:

$$-dv = \rho \cdot \frac{dr}{2\pi \cdot r^2} \cdot I \quad 4.10$$

$$\int -dv = \int \left(\rho \cdot \frac{dr}{2\pi \cdot r^2} \cdot I \right) \quad 4.11$$

$$V = \rho \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad 4.12$$

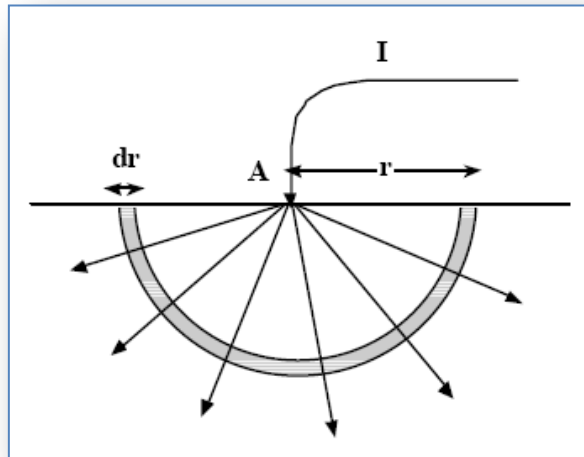


Figura 4.1 Inyección de corriente en el suelo a través de un electrodo.[1]

Si se considera que para introducir la corriente “ I ”, debe existir otro electrodo “ B ”, por lo tanto el potencial generado en el punto “ M ” será igual al producido por el electrodo “ A ” menos el producido por el electrodo “ B ”.

Ahora para calcular el potencial en el punto “ M ”, se debe aplicar la expresión 4.8 dos veces y restando¹⁰, se obtiene el potencial en el punto “ M ”. (Ver figura 4.2)

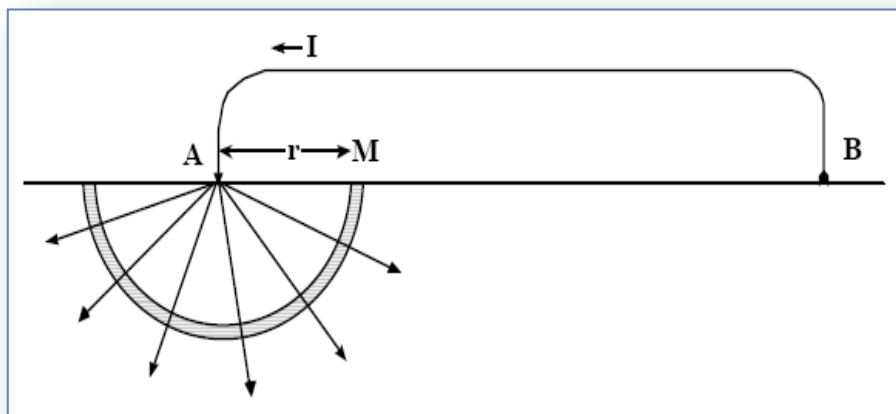


Figura 4.2 Inyección de corriente en un terreno por medio de los dos electrodos de una fuente. [1]

¹⁰ Por un extremo se introduce la corriente al terreno y por el otro extremo se extrae la corriente del terreno, considere cada proceso, uno contrario al otro.

$$V_M = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot AM} - \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot BM} \quad 4.13$$

Donde: “AM” es la distancia desde el electrodo “A” hasta el punto “M”.
 “BM” es la distancia desde el electrodo “B” hasta el punto “M”.

En la práctica no se mide el potencial en un punto¹¹, sino que se mide la diferencia de potencial entre dos puntos “M” y “N”.

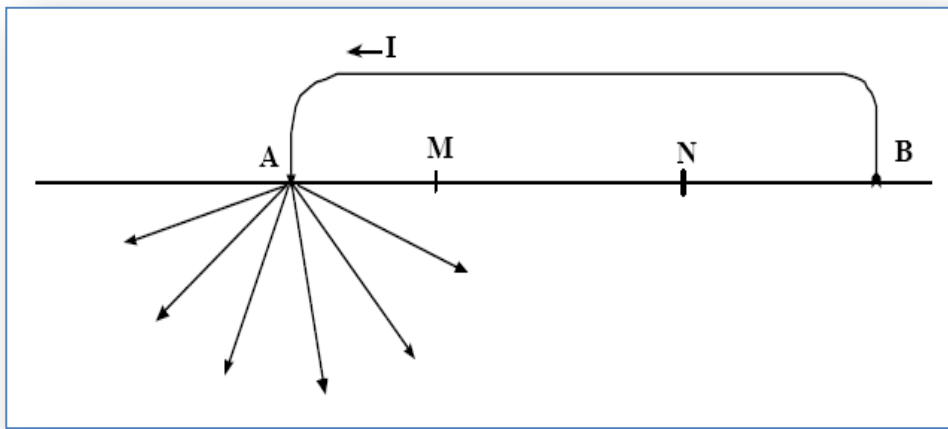


Figura 4.3 Disposición de electrodos para la medida de tensión en un terreno. [1]

De igual forma se aplica la ecuación 5.2 al punto “N”, el cual conforma los dos puntos de medida de la tensión en el terreno, cuando se hace circular una corriente “I” por los puntos “A” y “B” a través de un par de electrodos.

$$V_N = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot AN} - \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot BN} \quad 4.14$$

Donde: “AN” es la distancia desde el electrodo “A” hasta el punto “N”.
 “BN” es la distancia desde el electrodo “B” hasta el punto “N”.

Por lo tanto, la diferencia de potencial entre los puntos “M” y “N”, es la diferencia entre las tensiones que tenga cada punto.

¹¹ Para ello habría que situar uno de los terminales del voltímetro en el infinito.

$$V_M - V_N = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad 4.15$$

Para calcular el valor de la resistividad, se despeja de la ecuación 4.15 y se tiene que:

$$\rho = \frac{(V_M - V_N)}{(I)} \frac{(2\pi)}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad 4.16$$

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{(2\pi)}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad 4.17$$

Si se toma la segunda fracción de la ecuación 4.17 y se define como el coeficiente geométrico del dispositivo "K", se tiene una expresión muy sencilla para el cálculo de la resistividad.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad 4.18$$

Si revisamos cuidadosamente las metodologías más populares, por su sencillez y demás tenemos que:

- Para la metodología de Wenner: El espacio entre dos electrodos adyacentes es la igual a "a" (simétrico). Por tanto, al calcular la constante geométrica de este dispositivo se puede hacer con la ecuación 4.14, y su valor es igual a:

$$K = 2\pi \cdot a \quad 4.19$$

Donde las distancias son: "AM" = "a", "BM" = 2.a, "AN" = 2.a, "BN" = "a".

- Para la metodología de Schlumberger: El espacio entre los electrodos para medir la tensión es igual a un quinto de la distancia a la que se coloca cada electrodo de inyección de corriente respecto a cada electrodo de medición de tensión. Por tanto al calcular la constante geométrica de este dispositivo se puede hacer con la ecuación 4.14, y su valor es igual a:

$$K = \pi \cdot \left(\frac{AM \cdot AN}{MN} \right) = 6\pi \cdot a \quad 4.20$$

Donde las distancias son: “AM” = a, “BM”= 6.a/5, “AN”=6.a/5, “BN”=a.

Se puede ver claramente que este coeficiente geométrico depende solamente de las distancias que existe entre los cuatro electrodos.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad 4.21$$

• 4.3 SONDEOS ELÉCTRICOS Y CALICATAS ELÉCTRICAS.

Básicamente, existen dos estrategias para deducir la estructura del suelo con una serie de medidas sucesivas de la resistividad aparente “ ρ_a ”. [1]

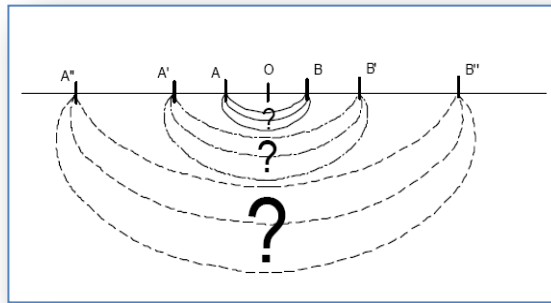


Figura 4.4 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico. [1]

Se puede observar en la figura 4.4 que aumentando sucesivamente la distancia AB establecida para los electrodos de inyección de corriente del modelo de Schlumberger, respecto al punto de referencia “O”, la corriente eléctrica traza caminos que comprenden, trayectorias a mayor profundidad¹². Los valores de la resistividad aparente que se van obteniendo, corresponden a profundidades cada vez mayores, por tanto se puede decir que se realiza un sondeo eléctrico vertical (SEV). [1]

En cambio, en la figura 4.5, se puede observar que si se mantiene la distancia entre los electrodos de inyección de corriente “AB” y se desplaza todo el dispositivo de medida lateralmente, la profundidad de exploración se mantendrá aproximadamente constante de

¹² Esto es un esquema conceptual, que raya en la simplicidad, ya que la corriente no se limita a tres trayectorias como lo muestra el gráfico, sino que el flujo eléctrico discurrirá desde la misma superficie hasta profundidades sin un límite fijo.

esta forma se realiza una exploración lateral del terreno, esta metodología se conoce como calicata eléctrica.¹³

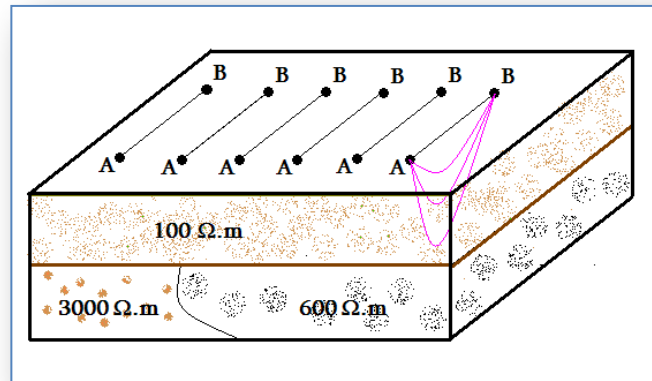


Figura 4.5 Esquema simplificado de una calicata eléctrica.

• 4.4 CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE.

Para la construcción de una gráfica se requiere consignar el valor de la resistividad del terreno en [$\Omega.m$] (eje de las abscisas), correspondiente a cada separación de los electrodos (AB) en metros [m] (eje de las ordenadas), de esta forma se obtiene la curva de resistividad aparente del terreno. Ver figura 4.6

Para el dispositivo electródico de Schlumberger los resultados se representan en un gráfico de escala logarítmica en el eje de las abscisas, donde se consigna la distancia AB/2 de cada medida, y en la ordenada la resistividad aparente correspondiente a cada punto. Es interesante observar que las distancias se van espaciando de modo que al representarlas en escala logarítmica quedan equidistantes.

La interpretación de la forma de esta curva permite verificar los espesores y resistividades de formaciones geológicas del terreno donde se ejecuto el sondeo eléctrico vertical (SEV).

¹³ Descripción didáctica y simplista, puesto que el asunto es más complejo.

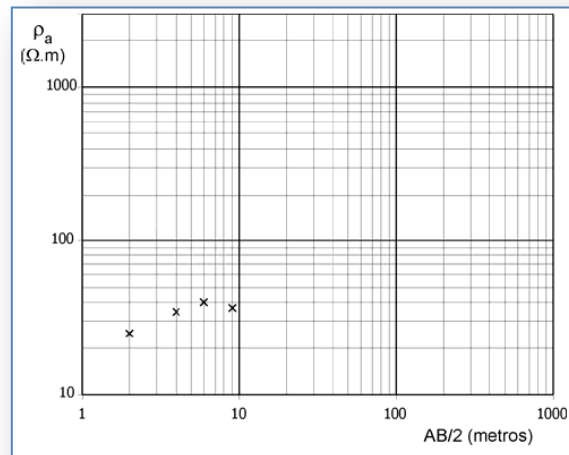


Figura 4.6 Curva de resistividad del terreno para dispositivo Schlumberger. [1]

Es importante tener claro que el subsuelo debe estar formado por varias capas horizontales y homogéneas, para que la curva de resistividad aparente obtenida se pueda interpretar. En muchos casos la realidad se acerca lo suficiente a esta descripción teórica, como para que los resultados sean aprovechables.

4.4.1 Corte geoelectrico.

Se debe tener en cuenta que un corte geoelectrico de “ n ” capas se compone de los siguientes elementos:

- “ n ” valores de resistividad.
- “ $n - 1$ ” espesores (no se conoce el espesor de la última capa).

4.4.1.1 Corte geoelectrico de dos capas.

Solamente se pueden presentar dos posibilidades:

- $\rho_1 > \rho_2$
- $\rho_1 < \rho_2$

Véase el siguiente ejemplo, el cual permite interpretar los datos obtenidos en el sondeo eléctrico vertical.

Se tienen los siguientes valores: " ρ_1 " = 100 Ω .m y " ρ_2 " = 20 Ω .m.

Al iniciar el sondeo eléctrico vertical, la separación de los electrodos " AB " es pequeña, por tanto el flujo de la corriente pasa solamente por la primera capa, y se obtendría una resistividad igual a la de ρ_1 . (Ver gráfica 4.7)

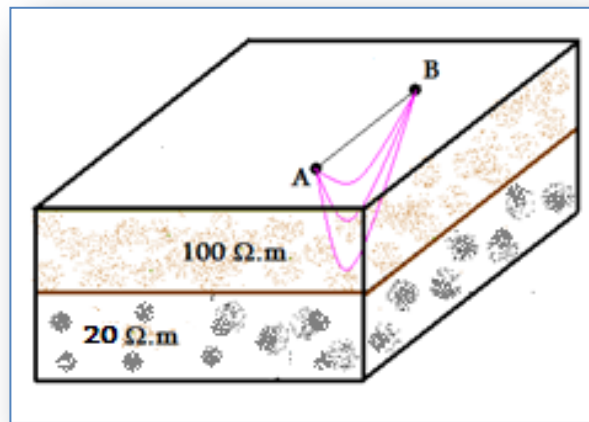


Figura 4.7 Trazado de la corriente en un sondeo eléctrico vertical.

Al realizar la segunda medida, la corriente trazaría varios caminos, una parte pasaría por la segunda capa, por lo que el valor de la resistividad aparente obtenida estaría entre 100 Ω .m y 20 Ω .m., por ejemplo 96 Ω .m. A medida que se aumenta la distancia " AB ", la corriente trazaría caminos a mayor profundidad, por lo que cada vez sería mayor la fracción de corriente que circula por la capa de 20 Ω .m, en consecuencia, los valores de la resistividad aparente " ρ_a " del subsuelo siempre estarían entre 100 Ω .m y 20 Ω .m, pero con una tendencia asintótica a 20 Ω .m. Una curva que se puede obtener será la que muestra la gráfica 4.8. [1]

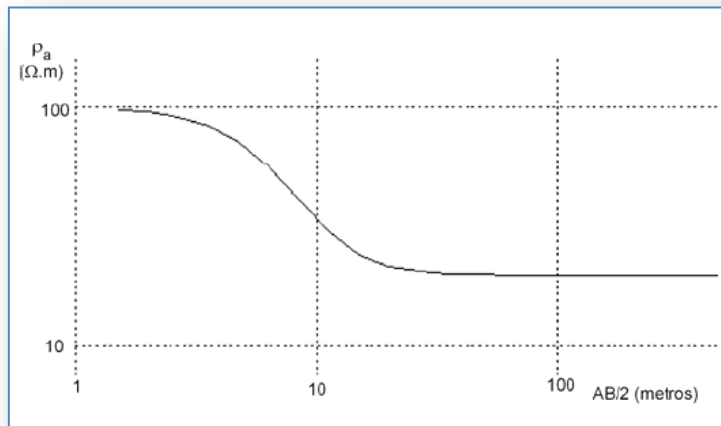


Figura 4.8 Curva de resistividad para un suelo de dos capas. [1]

Cualquier otro corte geoelectrico donde la segunda capa es un poco menor a la primera, nos proporciona la misma curva, salvo que situada un poco más arriba o un poco más abajo. Ver figura 4.9.

Ahora bien si se mantiene el valor de la resistividad de la primera capa " ρ_1 " = 100 $\Omega \cdot m$ y se tiene que la resistividad de la segunda capa puede ser cualquier valor, las posibilidades de representar la curva de resistividad según el sondeo eléctrico vertical está representado en la figura 4.9.

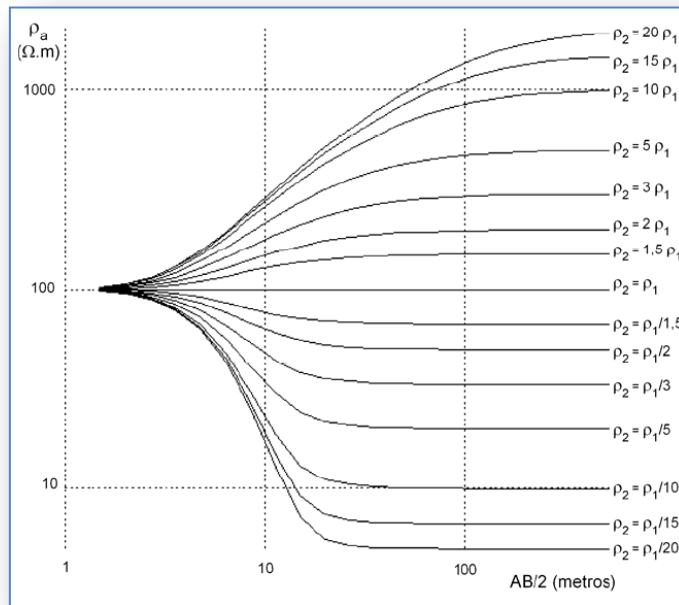


Figura 4.9 Posibles curvas de resistividad aparente para un terreno de dos capas “ ρ_1 ”= 100 Ω .m y un espesor de 3 m [1].

Si seguimos con los datos del ejemplo anterior “ ρ_1 ” = 100 Ω .m y “ ρ_2 ”= 20 Ω .m., y se contempla que el espesor de la primera capa es mayor, la curva comenzará a bajar más tarde, esto sugiere que es necesario aumentar la distancia entre los electrodos “AB”, para forzar a que las trayectorias de la corriente circulen por la capa más profunda [1]. Ver gráfica 4.10.

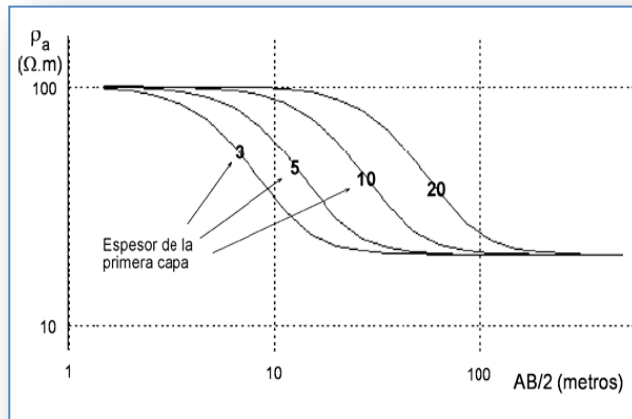


Figura 4.10 Variación de la curva con el espesor de la capa superior. [1]

4.4.1.2 Corte geoelectrico de tres capas.

Si se toma el ejemplo anterior y se supone una tercera capa bajo ellas, con una resistividad de " ρ_3 " = 600 Ω .m, y al realizar el sondeo eléctrico vertical de igual forma que el caso anterior, la curva comienza a bajar desde 100 hacia 20, en algún momento comenzará a subir hacia 600. Esto ocurrirá cuando una parte de las trayectorias de la corriente circulen a suficiente profundidad para atravesar la formación más profunda de 600 Ω .m, esto se refleja en que el valor medio que se calcula en superficie aumenta. Ver gráfica 4.11.

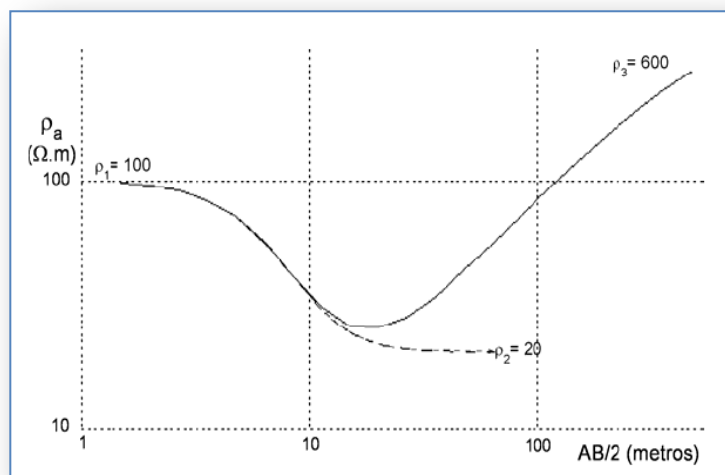


Figura 4.11 Curva de resistividad aparente de un terreno con tres capas. [1]

Para este caso, cuando el subsuelo se compone de tres capas con distintos valores de resistividad, se admiten cuatro posibilidades: [1].

1. Tipo H: La segunda capa es la menos resistiva de las tres, esto es $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.
2. Tipo K: La segunda capa es la más resistiva de las tres, esto es $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$.
3. Tipo A: La resistividad va aumentando con la profundidad, esto es $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.
4. Tipo Q: La resistividad va disminuyendo con la profundidad, esto es $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.

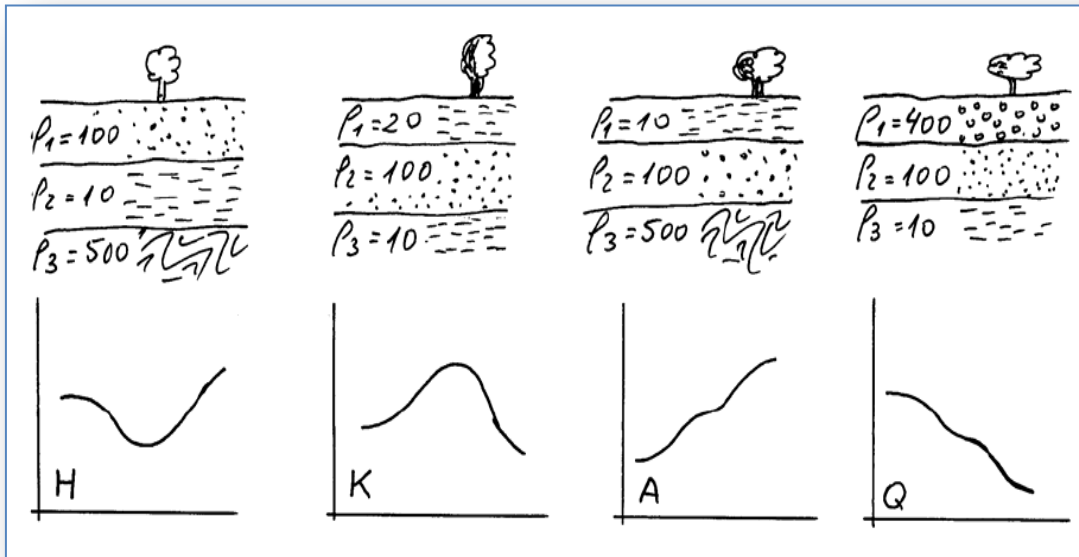


Figura 4.12 Posibles formas de curvas de acuerdo a cada posibilidad. [1]

Teniendo como referente el ejemplo que ilustra la figura 4.12, se puede presentar una variación de la curva, de acuerdo con el espesor de la segunda capa.

Si se considera la misma combinación del ejemplo ($\rho_1 = 100 \Omega.m$, $\rho_2 = 20 \Omega.m$ y $\rho_3 = 600 \Omega.m$), salvo que el espesor de la segunda capa es de mayor espesor. La curva de resistividad aparente resultante, debe comenzar a bajar de 100 hacia 20, para subir finalmente hacia 600 $\Omega.m$, pero en este caso se tarda en empezar a subir hacia " ρ_3 ". Véase en la figura 4.13 la variación de la figura 4.11 del ejemplo que se explica.

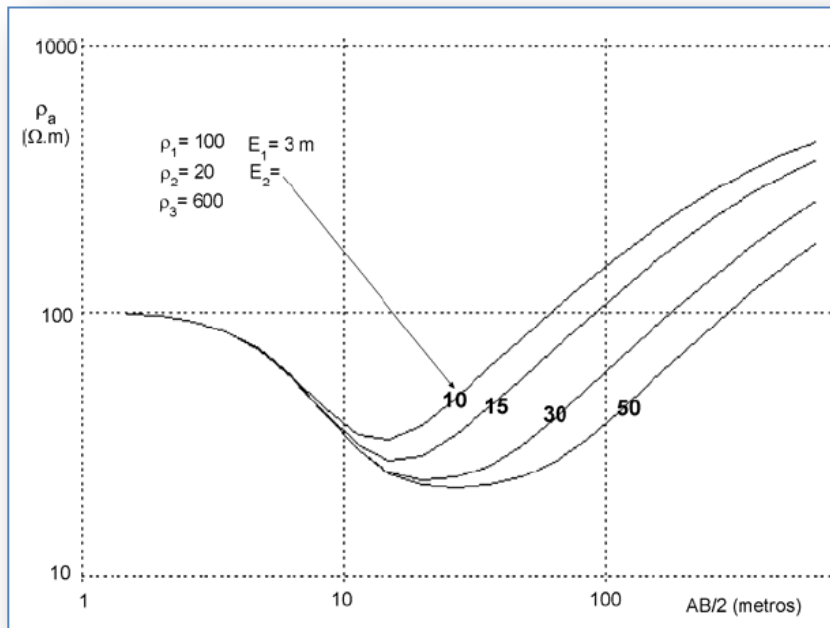


Figura 4.13 Variación de la curva con el espesor de la segunda capa. [1]

4.4.1.3 Corte geoelectrico de cuatro capas.

Un corte geoelectrico de cuatro o más capas se descompone en intervalos de 3 en 3, para esto de se le debe clasificar y dar su nomenclatura según 4.9, a cada tramo de tres (3).

Véase el siguiente ejemplo: En la figura 4.14 se puede observar que las tres primeras capas forman un gráfica tipo “H”. La segunda, tercera y cuarta capa dan lugar a una curva tipo “K”, finalmente, las capas, tercera cuarta y quinta forman una gráfica tipo “Q”.

En el análisis completo del corte, una vez interpretado se diría que es del tipo “HKQ”. Como se puede ver en la figura 4.15, el planteamiento de este corte geoelectrico para este terreno, nos genera una curva de resistividad aparente, la cual inicia bajando desde 145 hacia 38 $\Omega.m$ cambiando para comenzar a subir hacia 260 $\Omega.m$. Hubiera continuado por la línea punteada si la tercera capa hubiera sido de espesor infinito, pero cuando la corriente empieza a circular por la cuarta capa, la curva gira para empezar a bajar hacia 65 $\Omega.m$, finalmente inicia un descenso más pronunciado hacia 30 $\Omega.m$.

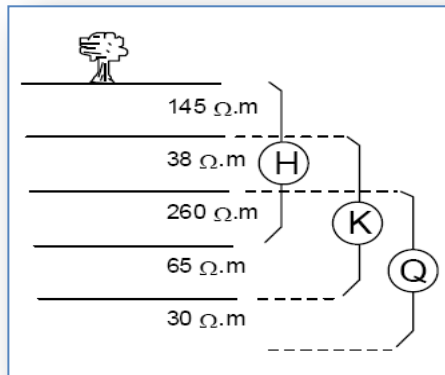


Figura 4.14 Corte geoelectrico de cuatro capas. [1]

Es interesante destacar que con estos cinco valores de resistividad que nos presenta el ejemplo, se pueden obtener curvas distintas a la presentada, dependiendo de los espesores de las cuatro primeras etapas.

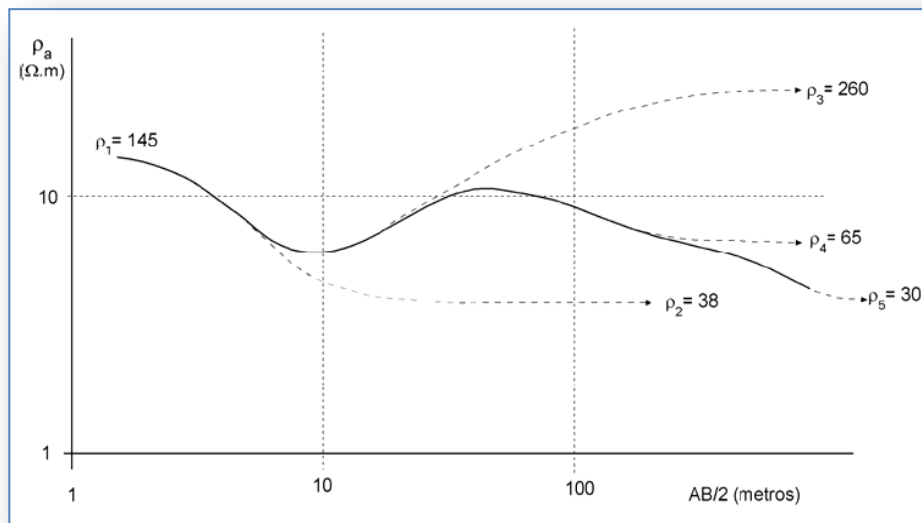


Figura 4.15 Curva de resistividad aparente para un terreno de cuatro capas. [1]

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS – CAPITULO 4

- [1]. F.J. Sanchez San Román. Departamento de Geología – Universidad de Salamanca. España.

CAPÍTULO 5

- **INFORMACION DE LOS SISTEMAS PARA CADA EDIFICION INSPECCIONADO**

Se realizó un trabajo de campo en cada instalación en particular, de cada inspección se obtuvo la siguiente información:

1. Registro fotográfico: Se hicieron registros fotográficos de los elementos que constituyen el sistema de puesta a tierra de cada edificio, para destacar las anomalías en este sistema, como también las características propias de cada instalación.

2. Obtención del perfil de resistividad del suelo: Se ejecutó el procedimiento establecido como oficial según norma RETIE y el estándar IEEE 81, para la obtención del perfil de resistividad del suelo, con el fin de determinar el valor de resistividad del suelo, el cual sería utilizado para el cálculo del sistema de puesta a tierra.

3. Medida del valor de la resistencia de puesta a tierra: Se ejecutó el procedimiento oficial según norma RETIE y el estándar IEEE 80, para la obtención del valor de la resistencia de puesta a tierra del sistema, para cada edificio del campus de la Universidad.

Con la información que se obtuvo en cada sistema eléctrico, correspondiente a cada edificio, se hizo un análisis de la misma y se hizo un diagnóstico, y se estableció algunas recomendaciones teniendo en cuenta las normas correspondientes para cada caso en particular.

- **5.1 EDIFICIO 1**

Conformado por el Bloque A (Área Administrativa) y el Bloque B (Facultad de Ingeniería Eléctrica y la Facultad de Ciencias Básicas)



Imagen 1. Edificio 1 según el Mapa Esquemático de la UTP

5.1.1 Edificio Administrativo

Edificio No.1, Bloque A, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

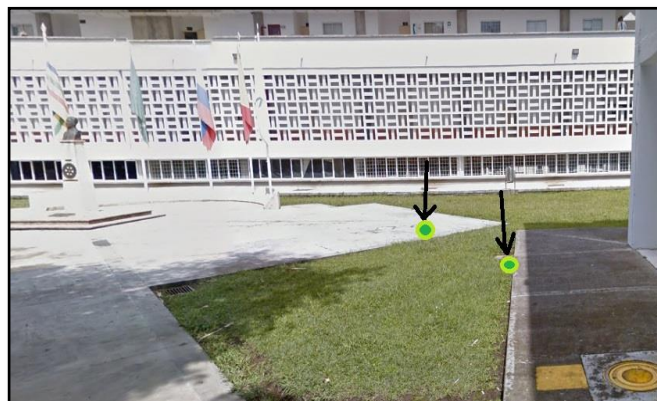
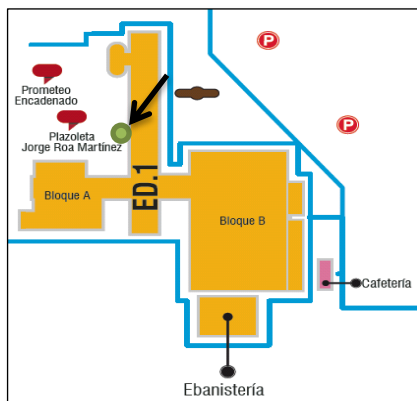


Imagen 2. Lugar de la medición del SPT del Edificio Administrativo

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Edificio Administrativo.



Imagen 3. Estado actual del SPT del Edificio de Eléctrica

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1.47Ω
Ver Anexo 1	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo A	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 1).
- Se recomienda hacer un registro con las condiciones generales del SPT, los niveles de corrosión, puntos de soldadura y/o puntos de unión.
- El SPT cumple con los valores recomendados por las normas, garantizando la seguridad de las personas y equipos:
 - Tiene electrodos de cobre según NEC 250-91, además de que se conservan en buen estado.
 - La malla presenta buenas uniones del cable a los electrodos según NEC 250-112.
- Falta señalización del SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, ante la ocurrencia de una falla, se pueda evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano consignados en la norma IEEE80 y la IEC 479.

Recomendaciones:

- La geometría de la malla es desconocida, por lo cual se sugiere realizar la inspección necesaria para determinar la geometría actual, ya que actualmente no se cuenta con planos del SPT para este Edificio.

5.1.2 Edificio de Eléctrica

Edificio No.1, Bloque B piso 0, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

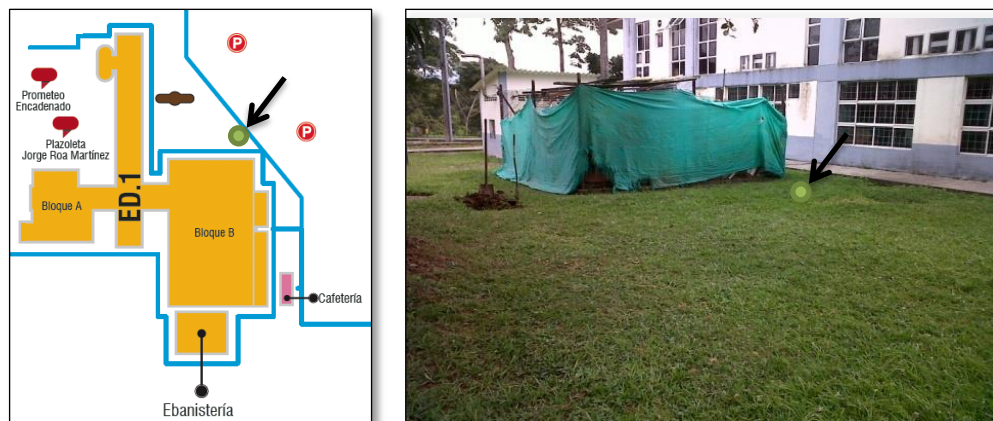


Imagen 4. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Eléctrica

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Edificio de Eléctrica.



Imagen 5. Estado actual del SPT del Edificio de Eléctrica

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	2.25Ω
Ver Anexo 2	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo B	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 2).
- La variación que se presenta en el perfil de resistividad del terreno con respecto al estudio anterior^[9] puede ser debida por los siguientes factores:
 - Temperatura
 - Compactación del terreno
 - Humedad del terreno.
 - Cambios en el pH del terreno.
- El valor de la resistencia de puesta a tierra se encuentra dentro de los valores recomendados por el RETIE para este tipo de aplicación.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir una falla, evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.
- El SPT no cuenta con cajas de inspección incumpliendo lo que se expresa en el artículo 15 del RETIE, el cual exige que se deben dejar puntos de conexión accesibles y de fácil medición.

Recomendaciones:

- Verificar la unión equipotencial de las dos mallas que existen en el sitio (SPT de Eléctrica y Ciencias Básicas). (se hace necesario una exploración física en el sitio).
- Si la exploración en el sitio muestra que efectivamente las mallas no están unidas, se debe proceder a realizar una unión entre ellas con un cable de cobre no menor a 2/0 de cobre y una unión exotérmica.
- Construir cajas de inspección que faciliten la ubicación, mantenimiento y mediciones del SPT, el RETIE recomienda en su artículo 15 que sus dimensiones internas deben ser

mínimo de 30 cm x 30 cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible.

- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80 para los umbrales tensiones de paso o contacto admisibles.

5.1.3 Edificio de Ciencias Básicas

Edificio No.1, Bloque B piso 1, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

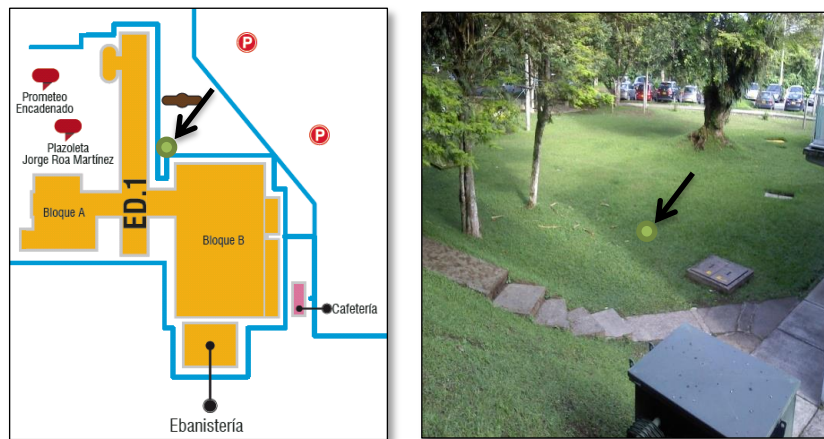


Imagen 6. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Ciencias Básicas

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Edificio Administrativo.



Imagen 7. Estado actual del SPT del Edificio de Ciencias Básicas

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	7,96 Ω
Ver Anexo 3	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo C	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 3).
- El valor de la resistencia tiene un aumento en un factor de 1.76 Ω con respecto al estudio realizado en el 2003, este aumento es debido a:
 - Cambios geológicos en el terreno (resistividad).
 - Deterioro de los cables, electrodos y empalmes del SPT.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir una falla, evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.
- El SPT no cuenta con cajas de inspección incumpliendo lo que se expresa en el artículo 15 del RETIE, el cual exige que se deben dejar puntos de conexión accesibles y de fácil medición.

Recomendaciones:

- Se recomienda verificar la unión de las dos mallas que existen en el sitio (SPT de Eléctrica y Ciencias Básicas). (se hace necesario una exploración física en el sitio). Si la exploración en el sitio muestra que efectivamente las mallas no están unidas, se debe proceder a realizar una unión entre ellas con un cable de cobre no menor a 2/0 de cobre y una unión exotérmica.
- Construir cajas de inspección que faciliten la ubicación, mantenimiento y mediciones del SPT, el RETIE recomienda en su artículo 15 que sus dimensiones internas deben ser mínimo de 30 cm x 30 cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible.
- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80,

como también se debe definir un estado óptimo del sistema bajo prueba ya que si en una inspección muestra que se requieren reparaciones, estas deben ser realizadas sin retraso y no ser pospuestas hasta el próximo ciclo de mantenimiento. Los trabajos de inspección y mantenimiento deben garantizar una continua actualización del SPT para el cumplimiento del RETIE.

• **5.2 EDIFICIO 2**

Conformado por la Vicerrectoría de Responsabilidad Social y Bienestar Universitario.



Imagen 8. Edificio 2 según el Mapa Esquemático de la UTP

5.2.1 Vicerrectoría de Responsabilidad Social y Bienestar Universitario

Edificio No.2, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	---
Valor de la resistencia:	---
Ver Anexo 4	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo D	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de resistividad del suelo (Anexo D).

- En este edificio se realizó la medida de resistividad del suelo, sin embargo, no se efectuó ninguna medida de resistencia del SPT, ya que este edificio depende de la malla del Edificio de Eléctrica.
- La coordinación de las protecciones para este edificio no es la adecuada, ya que la ubicación de la malla principal (Edificio de Eléctrica) respecto al tablero de protecciones para este edificio, puede generar retardos o mal funcionamiento.

Recomendaciones:

- Se recomienda plantear la instalación de un SPT nuevo para este edificio, ya que toda instalación eléctrica que le aplique el RETIE debe de disponer de este elemento, para garantizar la seguridad de las personas, la protección de los equipos e instalaciones y la compatibilidad electromagnética, como se estipula en el artículo 15 del RETIE, para ello se propone un diseño de SPT basado en los lineamientos de la norma IEEE80 (Anexo D1).
- Se debe mantener una conexión equipotencial con la malla de eléctrica. Las conexiones que van bajo el nivel del suelo (puesta a tierra), deben ser realizadas con soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo conforme a la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.

• 5.3 EDIFICIO 3

Conformado por el Edificio de Sistemas, CRIE, Facultad de Ingenierías, Registro y Control Académico y la División de Sistemas y Procesamiento de Datos.



Imagen 9. Edificio 3 según el Mapa Esquemático de la UTP

5.3.1 Edificio de Sistemas, CRIE, Facultad de Ingenierías, Registro y Control Académico

Edificio No.3, jardín principal del edificio, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

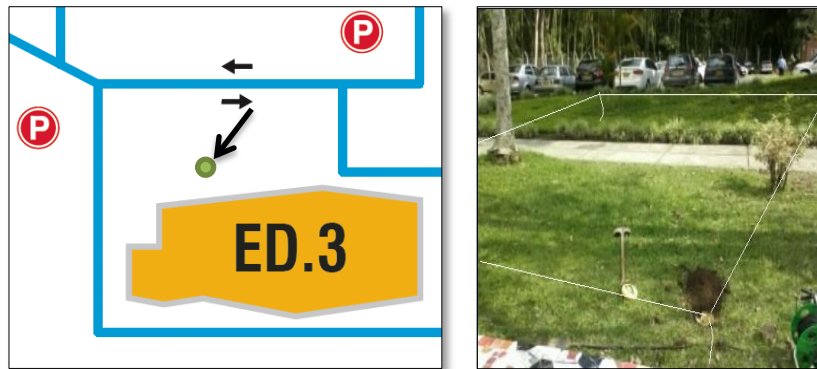


Imagen 10. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Sistemas, CRIE, Facultad de Ingenierías, Registro y Control Académico

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,16 Ω
Ver Anexo 5	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo E	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 5).
- Debido a las dimensiones de la malla, se tuvo que realizar varias mediciones, que comprobaran el valor de la resistencia del SPT, ya que las edificaciones vecinas interferían con la correcta medición.
- La malla de puesta a tierra se encuentra enterrada a una distancia aproximada de 80cm, y esta al no contar con cajas de inspección, se dificulta la correcta identificación de los puntos de interconexión del SPT.
- El SPT no cuenta con cajas de inspección incumpliendo lo que se expresa en el artículo 15 del RETIE, el cual exige que se deben dejar puntos de conexión accesibles y de fácil medición.

Recomendaciones:

- Comprobar la posible conexión equipotencial del SPT de la malla del bloque CRIE y el transformador para este edificio, ya que, para un mismo edificio, quedan expresamente prohibidos los sistemas de puesta a tierra independientes para cada aplicación, según criterio adoptado de la IEC 61000-5-2, el cual está establecido igualmente en la NTC 2050 y en la IEC 60364.
- Construir cajas de inspección que faciliten la ubicación, mantenimiento y mediciones del SPT, el RETIE recomienda en su artículo 15 que sus dimensiones internas deben ser mínimo de 30 cm x 30 cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible.

5.3.2 Transformador Edificio 3

Edificio No.3, esquina inferior derecha de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira



Imagen 11. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Sistemas, CRIE, Facultad de Ingenierías, Registro y Control Académico

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Transformador del Edificio 3.



Imagen 12. Estado del SPT del Edificio de Ciencias Básicas

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	6,30 Ω
Ver Anexo 6	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo F	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia de puesta a tierra (Anexo 6).
- Sería muy importante verificar la unión de los SPT existentes que conforman el sistema de puesta a tierra del edificio, garantizando que exista una referencia única para todo el sistema eléctrico del edificio, además la interconexión entre los SPT ayudaría a disminuir el valor de la resistencia de puesta a tierra.
- Se observa deterioro en el SPT lo cual conlleva a que el valor de la resistencia de puesta a tierra se vea afectada, es necesario realizar mantenimientos periódicos, donde se implementen las medidas preventivas y correctivas necesarias para garantizar la seguridad de las personas.
- El SPT tiene una instalación inadecuada ya que el conductor está expuesto al contacto con personas, donde accidentalmente se pueden generar tensiones de contacto por contacto directo con el cable expuesto.

- **5.4 EDIFICIO 4**

Conformado por la Facultad de Ingeniería Mecánica.



Imagen 13. Edificio 4 según el Mapa Esquemático de la UTP

5.4.1 Edificio de Mecánica

Edificio No.4, costado izquierdo de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 14. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Mecánica

Registro fotográfico del estado actual del SPT del edificio de Mecánica



Imagen 15. Estado del SPT del Edificio de Mecánica

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,07 Ω
Ver Anexo 7	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo G	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia de la malla (Anexo 7).
- La ubicación de la malla es la apropiada, ya que se encuentra aislada de las personas bajo un encerramiento.
- El SPT no cuenta con cajas de inspección incumpliendo lo que se expresa en el artículo 15 del RETIE, el cual exige que se deben dejar puntos de conexión accesibles y de fácil medición.

Recomendaciones:

- Construir cajas de inspección que faciliten la ubicación, mantenimiento y mediciones del SPT, el RETIE recomienda en su artículo 15 que sus dimensiones internas deben ser mínimo de 30 cm x 30 cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible.

- **5.5 EDIFICIO 5**

Conformado por la Facultad de Ingeniería Industrial.



Imagen 16. Edificio 5 según el Mapa Esquemático de la UTP

5.5.1 Edificio de Industrial

Edificio No.5, extremo derecho de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

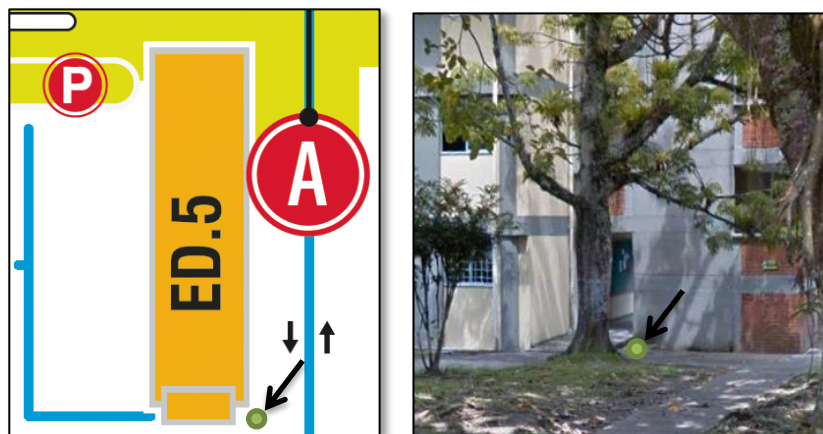


Imagen 17. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Industrial

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Edificio de Industrial.



Imagen 18. Estado del SPT del Edificio de Industrial

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,45 Ω
Ver Anexo 8	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo H	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 8).
- El SPT cumple los siguientes puntos según lo establecido por la norma, garantizando la seguridad de las personas y equipos:
 - Tiene electrodos de cobre según NEC 250-91, además de que se conservan en buen estado.
 - La malla presenta buenas uniones del cable a los electrodos según NEC 250-112.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir una falla, evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.
- Falta señalización para el SPT, que evite el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, ante la ocurrencia de una falla, se evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.

Recomendaciones

- Realizar el diagrama del SPT actual, ya que debido a las construcciones en concreto (aceras y edificaciones), no se pudo especificar con claridad las dimensiones de la malla, y dentro de la información recolectada no se encontraron planos existentes de las características geométricas para la malla de puesta a tierra.
- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80 para los umbrales tensiones de paso o contacto admisibles.

• 5.6 CAFETERIA CENTRAL “EL GALPÓN”

Cafetería Central, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

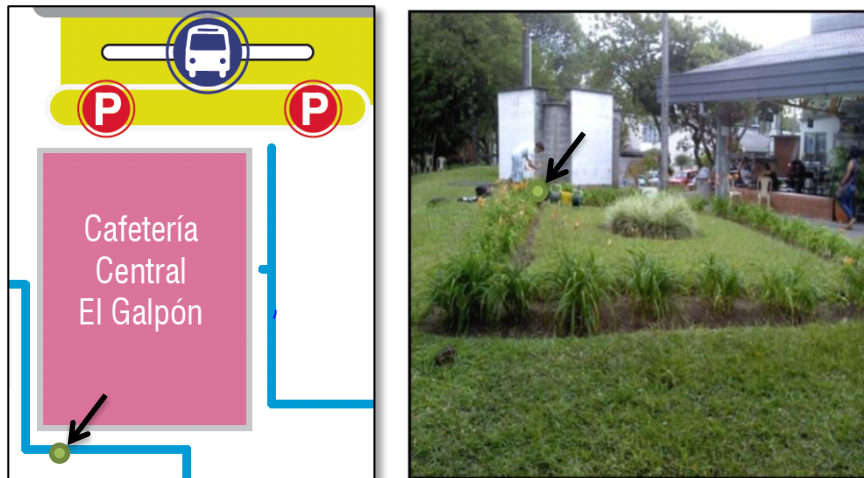


Imagen 19. Lugar de la medición del SPT de la Cafetería Central “El Galpón”

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,43 Ω
Ver Anexo 9	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo I	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 9).
- Actualmente el SPT utiliza una configuración en malla, conexiones exotérmicas y calibre de conductor 2/0 AWG, cumpliendo con los requerimientos de materiales y de construcción del Artículo 15 del RETIE para sistemas de puesta a tierra.
Esto garantiza que los valores de resistencia obtenidos se pueden comparar con los valores máximos, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552. El cumplimiento de las normas garantiza que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.
- El STP del edificio y el transformador se encuentran interconectados, lo cual ayuda a que disminuya la resistencia de puesta a tierra, esto es ideal para todo SPT, además de que cumple con los criterios de conexión equipotencial definidos por el RETIE.

Recomendaciones:

- Implementar un plan de mantenimiento periódico, que garantice un buen funcionamiento del transformador, ya que éste, supe de energía a distintas áreas administrativas que conforman el edificio, además del Edificio de Química.
- Realizar una medición periódica de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra, ya que se apreció un cambio en el perfil de resistividad respecto a estudios anteriores y los cambios geológicos (humedad, temperatura, contenido de sales del terreno) afectan la resistividad del suelo, la cual va ligada directamente con el valor de la resistencia de puesta a tierra.

• 5.7 EDIFICIO 6

Conformado por la Escuela de Química – Tecnología Química.



Imagen 20. Edificio 6 según el Mapa Esquemático de la UTP

5.7.1 Edificio de Química

Edificio No.6, jardín interno de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 21. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Química.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	45,73 Ω
Ver Anexo 10	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo J	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 10).
- En el momento de realizarla medición de la resistencia de puesta a tierra se encontró que uno de los tres electrodos de la malla esta desenterrado.
- El valor de resistencia de puesta a tierra excede los valores recomendados por el RETIE, lo cual indica que se debe rediseñar la malla, utilizando los elementos adecuados (cable, soldadura exotérmica, varillas cu-cu, etc.), para garantizar una conexión solida a tierra con un valor menor de resistencia de puesta a tierra que minimice los riesgos por tensiones de paso y contacto, para las personas que por allí transitan.
- Según información recopilada por los técnicos electricistas del área de mantenimiento, existe un conductor que sirve como referencia de puesta a tierra, el cual se conecta al SPT de la Cafetería Central (Galpón).

Recomendaciones:

- Se recomienda interconectar los sistemas de puesta a tierra temporales instalados para necesidades particulares de los laboratorios, que están bajo el nivel del terreno, ya que si no existe esta conexión equipotencial se puede presentar entre ellas diferencias de potencial que afecten la integridad de las personas, además de diferentes niveles de referencia para la magnitud de tensión. Esto puede generar ruido o mal funcionamiento en equipos de medida sensibles a fluctuaciones de la magnitud de tensión.
- Se recomienda plantear un nuevo SPT para este edificio, ya que toda instalación eléctrica que le aplique el RETIE debe de disponer de este elemento, para garantizar la seguridad de las personas, la protección de los equipos e instalaciones y la compatibilidad electromagnética, como se estipula en el artículo 15 del RETIE, para ello se propone un diseño de SPT basado en los lineamientos de la norma IEEE80 (Anexo J1).
- Mantener la conexión equipotencial con el SPT de la Cafetería Central, posterior a la construcción del SPT, brinda mayor confiabilidad y seguridad al sistema. Las conexiones que van bajo el nivel del suelo (puesta a tierra), deben ser realizadas con soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo conforme a la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.

• 5.8 EDIFICIO 7

Conformado por el Bloque A (Facultad Ciencias de la Educación) y el Bloque B (Centro de Televisión, Oficina de Comunicaciones)



Imagen 22. Edificio 7 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.8.1 Edificio de Educación

Edificio No.7, Bloque A, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

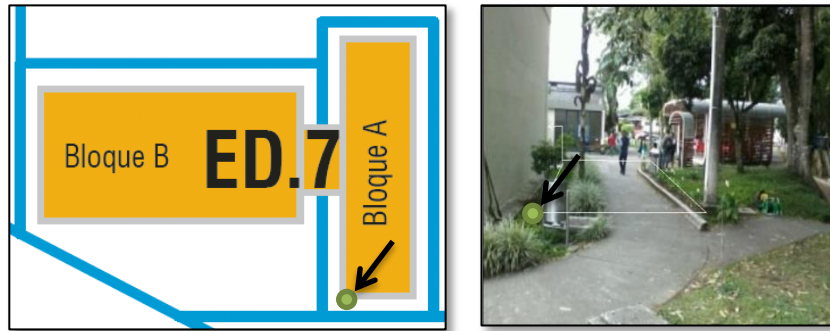


Imagen 23. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Educación.

Registro fotográfico del estado actual del SPT del edificio de Educación.



Imagen 24. Estado del SPT del Edificio de Educación.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,56 Ω
Ver Anexo 11	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo K	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia de puesta a tierra. (Anexo 11).
- Este edificio comparte el transformador con el edificio de comunicaciones, se puede realizar una interconexión entre el neutro del transformador y el conductor puesto a tierra del edificio de educación para mejorar el valor de la resistencia de este SPT.
- Se aprecia un recorrido no uniforme, deteriorado y bastante superficial en los cables que conforman la malla y malos empalmes en los electrodos. Para esto se recomienda un cambio el conductor que según el RETIE artículo 15 especifica que el conductor del electrodo de puesta a tierra o conductor a tierra, además del cobre, se pueden utilizar otros materiales conductores o aleación de ellos, siempre que se garantice su protección contra la corrosión durante la vida útil de la puesta a tierra y la resistencia del conductor no comprometa la efectividad de la puesta a tierra.
- El sitio que se escogió para la construcción viola las normas de seguridad para seres vivos, puesto que, en el momento de una descarga, sobre esta (superficie del suelo), se pueden generar potenciales peligrosos, apreciando que el área utilizada es un paso obligado de personas.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir una falla, evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.

Recomendaciones:

- Se recomienda hacer un nuevo diseño del sistema de puesta a tierra si los estudios de los umbrales de tensión de paso y de contacto se encuentran fuera de los rangos admisibles, garantizando la seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética, además de asegurar el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas ya que la resistencia de SPT es un valor que limita la máxima elevación de potencial, pueden tomarse como referencia los valores máximos, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552. teniendo en cuenta los siguiente:
 - Establecer un punto común para los conductores conectados a tierra (barraje para el neutro y barraje para tierra) y el conductor del electrodo de tierra [Nec-250-24(a)(4)]
 - Ubicación apropiada para la malla, que no presente riesgos para las personas.

5.8.2 Edificio de Comunicación

Edificio No.7, Bloque B, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

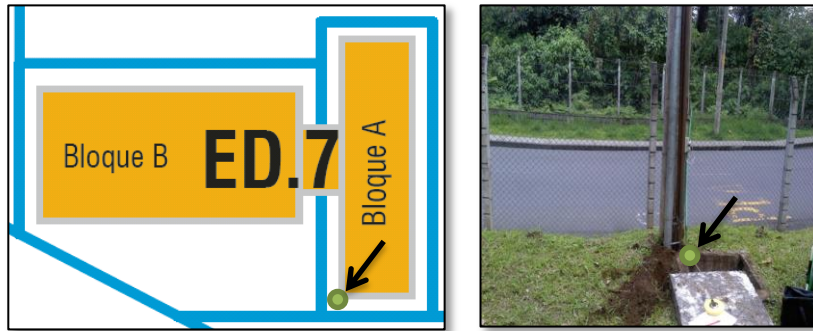


Imagen 25. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Comunicación.

Registro fotográfico del estado actual del SPT del edificio de Comunicaciones.



Imagen 26. Estado del SPT del Edificio de Educación.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,02 Ω
Ver Anexo 12	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo L	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 12).
- Actualmente los STP del edificio y el transformador se encuentran interconectados, lo cual ayuda al que disminuya la resistencia de puesta a tierra, esto es ideal para todo SPT.
- Los elementos que conforman el SPT poseen indicios de corrosión debido a la humedad del sitio.
- El valor de resistencia de puesta a tierra puede ser afectado por las corrientes parasitas que se inyectan debidos a los equipos electrónicos que posee el edificio, por eso se tomó un valor mayor en el eje de la distancia ($C=6.5*L_{max}$), para poder apreciar mejor la zona lineal del SPT y como consecuencia tener una mayor confiabilidad en los datos obtenidos.

Recomendaciones:

- Realizar una medición periódica de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra, donde se analice los cambios geológicos (humedad, temperatura, contenido de sales del terreno) que afectan la resistividad del suelo, la cual va ligada directamente con el valor de la resistencia de puesta a tierra.

• 5.9 EDIFICIO 8

Conformado por el Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos



Imagen 27. Edificio 8 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.9.1 Edificio de Aguas

Edificio No.8, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 28. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Aguas.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	6.05 Ω
Ver Anexo 13	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo M	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 13).
- El valor obtenido en la medida de la resistencia de puesta a tierra cumple con los valores establecidos en la norma. (NTC 2050).
- Comprobar la conexión equipotencial del SPT con el transformador para este edificio, ya que, para un mismo edificio, quedan expresamente prohibidos los sistemas de puesta a tierra independientes para cada aplicación, según criterio adoptado de la IEC 61000-5-2, el cual está establecido igualmente en la NTC 2050 y en la IEC 60364.

Recomendaciones:

- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del

RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80 para los umbrales tensiones de paso o contacto admisibles.

- **5.10 PLANETARIO**

Planetario, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

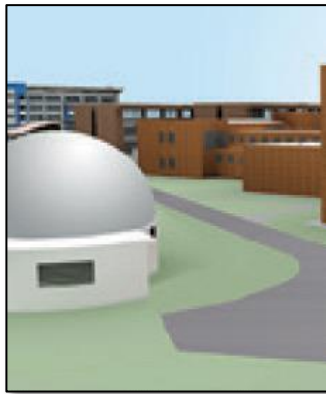


Imagen 29. Planetario según el Mapa Esquemático de la UTP.



Imagen 30. Lugar de la medición del SPT del Planetario.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	251 Ω
Ver Anexo 14	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo N	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 14).
- El valor de referencia excede considerablemente los límites recomendados por el RETIE para este tipo de aplicación, por lo cual el SPT debe ser rediseñado teniendo en cuenta los pasos recomendados por la IEEE 81 y el RETIE para este tipo de aplicaciones.
- El valor tan alto de la resistencia de puesta a tierra permite que, en cualquier momento, una descarga eléctrica pueda generar en el sitio gradientes de potencial elevados.

Recomendaciones:

- Se recomienda plantear un nuevo SPT para este edificio, ya que toda instalación eléctrica que le aplique el RETIE debe de disponer de este elemento, para garantizar la seguridad de las personas, la protección de los equipos e instalaciones y la compatibilidad electromagnética, como se estipula en el artículo 15 del RETIE, para ello se propone un diseño de SPT basado en los lineamientos de la norma IEEE80 (Anexo N1).
- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80 para los umbrales tensiones de paso o contacto admisibles.

• 5.11 EDIFICIO 9

Conformado por la Biblioteca y Auditorio Jorge Roa Martínez



Imagen 31. Edificio 9 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.11.1 Biblioteca - Malla principal

Edificio No.9, Parte inferior del edificio de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

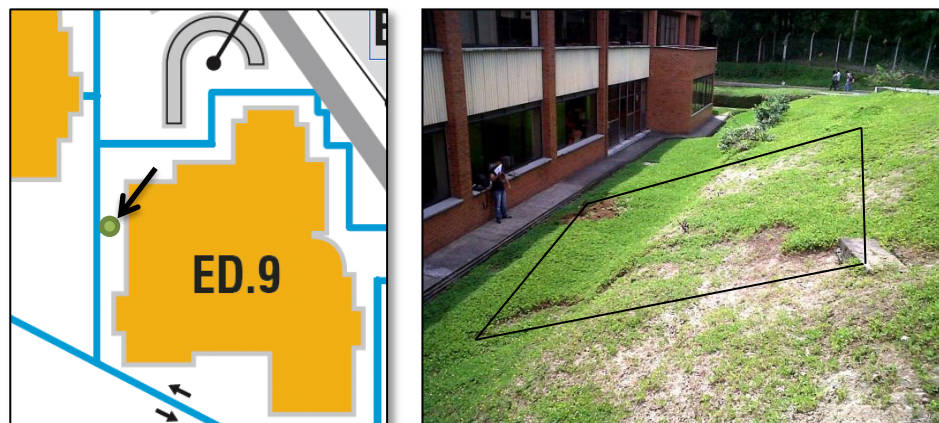


Imagen 32. Lugar de la medición del SPT de la Biblioteca - Malla principal.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1,17 Ω
Ver Anexo 15	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo O	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 15).
- Al realizar la inspección visualmente se aprecia que el sistema de puesta a tierra cumple con las siguientes normativas:
 - Tipos de electrodo de cobre [NEC 250-91].
 - Unión del cable con el electrodo soldadas [NEC 250-112].
 - Calidad de los conductores buena [NEC 250-91].
 - Calibre del conductor del sistema de puesta a tierra [NFPA 7803-12].
- Actualmente el SPT utiliza una configuración en malla, conexiones exotérmicas y calibre de conductor 2/0 AWG, cumpliendo con los requerimientos de materiales y de construcción del Artículo 15 del RETIE para sistemas de puesta a tierra. Esto garantiza que los valores de resistencia obtenidos se pueden comparar con los valores máximos, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC

4552. El cumplimiento de las normas garantiza que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.

Recomendaciones

- Se debe hacer un anillo de apantallamiento en la parte superior e inferior del edificio, el cual una todas las bajantes en la parte superior e inferior de la edificación, con el SPT del edificio, esto hará que el sistema sea más robusto y confiable. (NTC 4552).
- Realizar una medición periódica de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra, ya que se apreció un cambio en el perfil de resistividad respecto a estudios anteriores y los cambios geológicos (humedad, temperatura, contenido de sales del terreno) afectan la resistividad del suelo, la cual va ligada directamente con el valor de la resistencia de puesta a tierra.

5.11.2 Biblioteca - Transformador

Edificio No.9, lado superior izquierdo del edificio de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 33. Lugar de la medición del SPT de la Biblioteca - Transformador.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	52,50 Ω
Ver Anexo 16	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo P	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 16).
- El valor de referencia excede los límites recomendados por el RETIE para este tipo de aplicación, por lo cual el SPT debe ser rediseñado teniendo en cuenta los pasos recomendados por la IEEE 80 y el RETIE para este tipo de aplicaciones.

Recomendaciones

- Las altas tensiones que se pueden presentar en un sistema de puesta a tierra pueden ser provocadas por un valor de resistencia muy elevado, por consiguiente, es necesario hacerle una revisión periódica al transformador para evitar que haya un desplazamiento del punto de equilibrio del sistema provocando una alta tensión.
- Se recomienda realizar un sistema de puesta a tierra, teniendo en cuenta los siguientes puntos:
 - Perfil de resistividad del terreno.
 - Hacer un tratamiento con suelos artificiales. (Favigel, Sanick-Gel, etc.), necesario puesto que el terreno tiene un PH alto.
- Tener en cuenta el siguiente gráfico para la construcción del sistema de puesta a tierra del transformador.

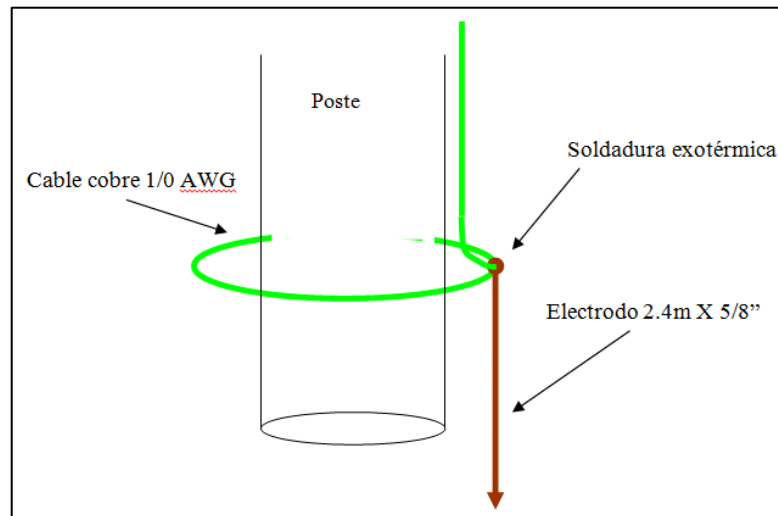


Figura 5. Esquema de sistema de puesta a tierra para transformador de distribución.

5.11.2 Biblioteca – Parte Posterior

Edificio No.9, lado derecho inferior del edificio de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 34. Lugar de la medición del SPT de la Biblioteca – Parte Posterior.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	54,97 Ω
Ver Anexo 17	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo Q	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 17).
- El tipo de sistema de puesta a tierra diseñado e instalado para este edificio no cumple con los criterios de los valores máximos para resistencia de puesta a tierra, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-42, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552.

Recomendaciones:

- Eliminar este sistema de puesta a tierra, ya que, según información recolectada, este SPT fue debido a una aplicación temporal que ya está fuera de servicio.
- Implementar una conexión con un conductor apropiado desde la malla hasta un barraje general de puesta a tierra. [Nec-250-94].
- Establecer una conexión equipotencial entre los barrajes de neutro y tierra en el tablero principal del edificio. [Nec-250-79].

5.11.2 Biblioteca – Jardín Interno

Edificio No.9, jardín interno del edificio, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 35. Lugar a realizar la medición del SPT de la Biblioteca – Jardín Interno.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	
Valor de la resistencia:	3.7 Ω
Ver Anexo 18	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo R	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 18).
- La existencia de varios sistemas de puesta a tierra no es conveniente para las instalaciones eléctricas de un edificio si no se encuentran equipotenciales entre sí. Este tipo de práctica permite la aparición de potenciales entre equipos y partes del sistema eléctrico del edificio que pueden poner en peligro tanto a las personas como a los equipos.

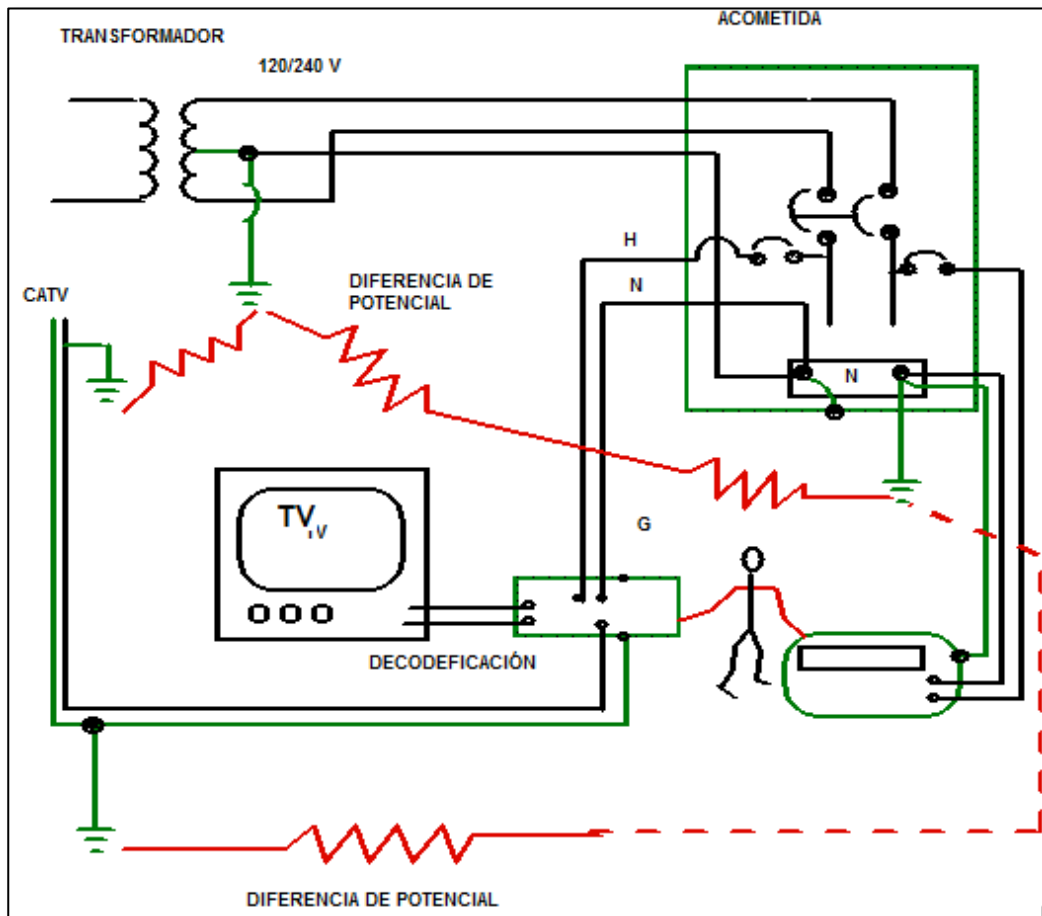


Figura 5.1 aparición de estos potenciales debido a la utilización de sistemas de puesta a tierra independientes.

Recomendaciones:

- Establecer una conexión equipotencial entre el SPT del Jardín interno de la biblioteca, los bajantes del sistema de apantallamiento y el SPT principal del edificio. La conexión se debe realizar por debajo del nivel del suelo (puesta a tierra), deben ser realizadas con cable calibre 2/0 AWG, soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo conforme a la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.

- **5.12 EDIFICIO 10**

Conformado por la Facultad de Ciencias Ambientales



Imagen 36. Edificio 10 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.12.1 Edificio de Medio Ambiente

Edificio No 10, Costado derecho centro de sur a norte. Según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 37. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Medio Ambiente

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	10,62 Ω
Ver Anexo 19	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo S	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 19).
- Actualmente el SPT utiliza una configuración en malla, conexiones exotérmicas y calibre de conductor 2/0 AWG, cumpliendo con los requerimientos de materiales y de construcción del Artículo 15 del RETIE para sistemas de puesta a tierra.
Esto garantiza que los valores de resistencia obtenidos se pueden comparar con los valores máximos, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552. El cumplimiento de las normas garantiza que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.
- Comprobar la conexión equipotencial del SPT de la malla del bloque ambiental y el transformador para este edificio, ya que, para un mismo edificio, quedan expresamente prohibidos los sistemas de puesta a tierra independientes para cada aplicación, según criterio adoptado de la IEC 61000-5-2, el cual está establecido igualmente en la NTC 2050 y en la IEC 60364.

Recomendaciones:

- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80 para los umbrales tensiones de paso o contacto admisibles.
- Realizar una medición periódica de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra, ya que se apreció un cambio en el perfil de resistividad respecto a estudios anteriores y los cambios geológicos (humedad, temperatura, contenido de sales del terreno) afectan la resistividad del suelo, la cual va ligada directamente con el valor de la resistencia de puesta a tierra.

5.12.2 Edificio de Medio Ambiente - Transformador

Edificio No 10 Transformador, Costado derecho centro de sur a norte. Según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

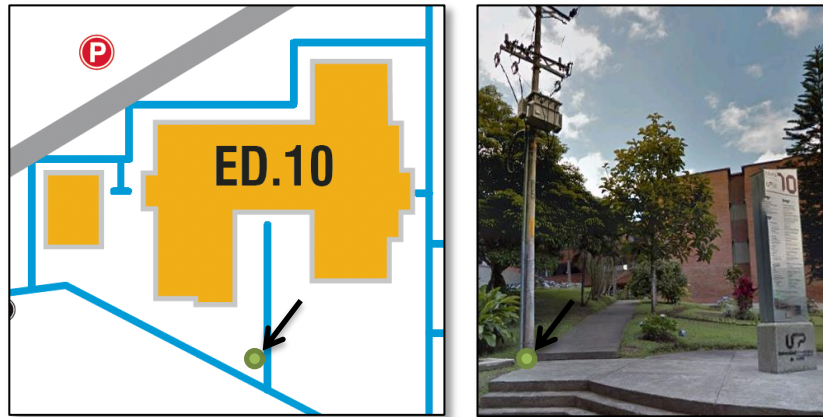


Imagen 38. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Medio Ambiente - Transformador

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	15,47 Ω
Ver Anexo 20	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo T	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesto a tierra (Anexo 19).
- El bajante SPT presenta un alto grado de corrosión y sulfatación debido al PH elevado del suelo para esta zona, lo que conlleva a concluir que el estado total de electrodo de puesta a tierra está en igual condición, esto se puede confirmar en la medida elevada que se obtuvo de la resistencia de puesta a tierra.
- Establecer una conexión equipotencial entre el SPT del Edificio de Ambiental, los bajantes del sistema de apantallamiento y el SPT del transformador. La conexión se debe realizar por debajo del nivel del suelo (puesta a tierra), deben ser realizadas con cable calibre 2/0 AWG, soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo conforme a la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.

Recomendaciones

- Se recomienda hacer un nuevo diseño del sistema de puesta a tierra cumpliendo con los siguientes puntos:
 - Establecer un punto común para los conductores conectados a tierra y el conductor del electrodo de tierra.
 - Tensión de Contacto.
 - Tensión de paso.
 - Interconexión con otros SPT.
 - Tener en cuenta el gráfico de la figura (5) para la construcción del sistema de puesta a tierra del transformador.

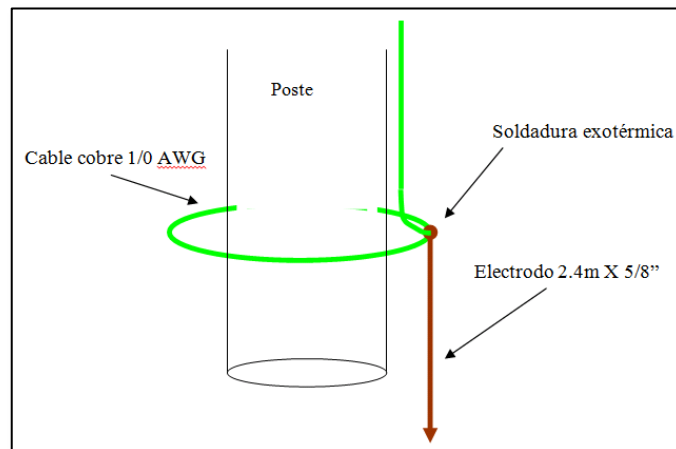


Figura 5. Esquema de sistema de puesta a tierra para transformador de distribución.

• 5.13 EDIFICIO 11

Conformado por Bloque A (Centro de Visitantes - jardín Botánico), Bloque B (Centro de Visitantes - jardín Botánico) y Bloque C (Administración Jardín Botánico)



Imagen 39. Edificio 11 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.13.1 Jardín Botánico

Jardín Botánico, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

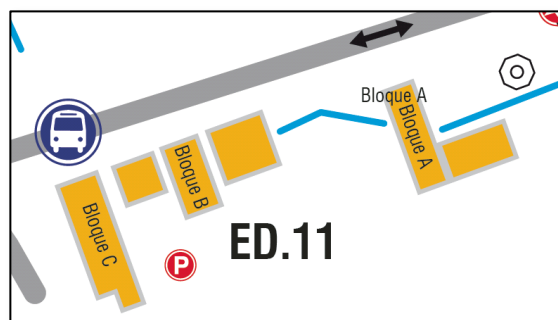


Imagen 40. Lugar de la medición del SPT del Jardín Botánico.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Sin Medicion
Valor de la resistencia:	--- Ω
Ver Anexo 21	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo U	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistividad del suelo (Anexo U).
- En este edificio se realizó la medida de resistividad del suelo, sin embargo, no se efectuó ninguna medida de resistencia del SPT, ya que este edificio depende de la malla del Centro Multidisciplinario (Bloque Y).
- La coordinación de las protecciones para este edificio no es la adecuada, ya que la ubicación de la malla principal (Centro Multidisciplinario – Bloque) respecto al tablero de protecciones para este edificio, puede generar retardos o mal funcionamiento.

Recomendaciones:

- Se recomienda plantear la instalación de un SPT nuevo para este edificio, ya que toda instalación eléctrica que le aplique el RETIE debe de disponer de este elemento, para

garantizar la seguridad de las personas, la protección de los equipos e instalaciones y la compatibilidad electromagnética, como se estipula en el artículo 15 del RETIE, para ello se propone un diseño de SPT basado en los lineamientos de la norma IEEE80 (Anexo U1).

- Se debe mantener una conexión equipotencial con la malla del centro multidisciplinario. Las conexiones que van bajo el nivel del suelo (puesta a tierra), deben ser realizadas con soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo conforme a la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.

• 5.14 EDIFICIO 12

Conformado por la Facultad de Bellas Artes y Humanidades.



Imagen 41. Edificio 12 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.14.1 Edificio de Bellas Artes

Edificio No 10. Extremo Oeste, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

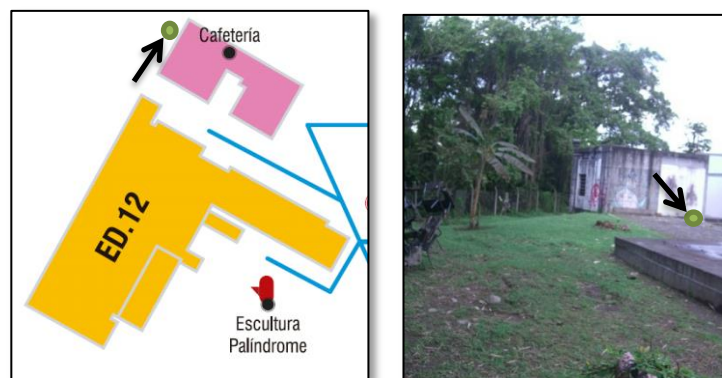


Imagen 42. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Bellas Artes

Registro fotográfico del estado actual del SPT del edificio de Bellas Artes.



Imagen 43. Estado del SPT del Edificio de Bellas Artes.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	19,20 Ω
Ver Anexo 22	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo V	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 22).
- La geometría de la malla es desconocida, por lo cual se sugiere realizar la inspección necesaria para determinar la geometría actual, ya que actualmente no se cuenta con planos del SPT para este Edificio.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir una falla, evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.

Recomendaciones:

- Este valor de resistencia es un poco elevado, por lo cual se debería realizar un tratamiento al suelo con suelos artificiales que ayuden a disminuir de forma efectiva el valor de la resistencia de puesta a tierra.
- Realizar una medición periódica de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra, donde se analice los cambios geológicos (humedad, temperatura, contenido de sales del terreno) que afectan la resistividad del suelo, la cual va ligada directamente con el valor de la resistencia de puesta a tierra.
- Buscar otros posibles SPT en el edificio así como las interconexiones entre los mismos, ya que no se pudo tener acceso a otras zonas del edificio por falta de permisos, que como se estipula en RETIE quedan expresamente prohibidos los sistemas de puesta a tierra independientes para cada aplicación, según criterio adoptado de la IEC 61000-5-2, el cual está establecido igualmente en la NTC 2050 y en la IEC 60364.
- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos de la norma IEEE 80 para los umbrales tensiones de paso o contacto admisibles.

• 5.15 EDIFICIO 13

Conformado por Bloque A (Centro Multidisciplinario, Observatorio Astronómico), Bloque B (Aulas de Clase)



Imagen 44. Edificio 13 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.15.1 Centro Multidisciplinario

Edificio No.13, costado derecho superior de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

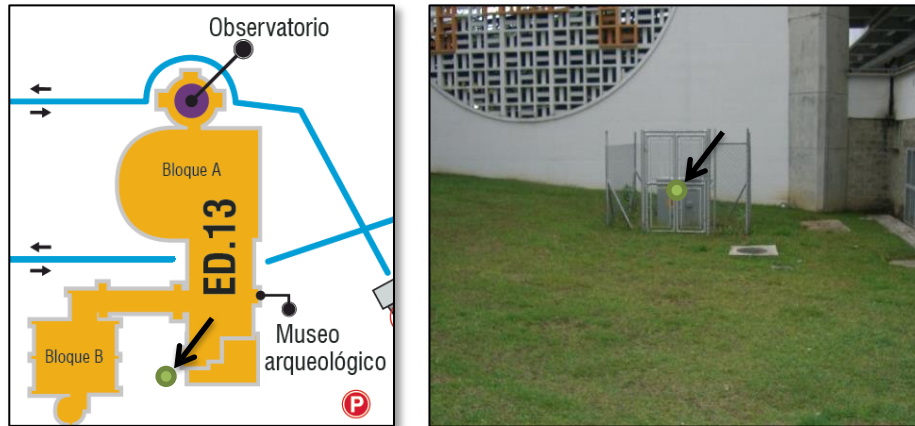


Imagen 45. Lugar de la medición del SPT del Edificio Multidisciplinario

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Centro Multidisciplinario.

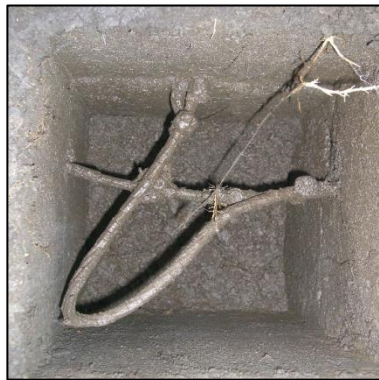


Imagen 46. Estado del SPT del Edificio Multidisciplinario.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	3,97 Ω
Ver Anexo 23	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo W	

Observaciones:

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 23).
- Este edificio no cuenta con mediciones de SPT o datos registrados anteriormente, ya que la construcción del edificio es relativamente nueva. Sin embargo existen planos que evidencian la construcción y geometría del SPT.
- Actualmente los STP del edificio y el transformador se encuentran interconectados, lo cual ayuda a que disminuya la resistencia de puesta a tierra, esto es ideal para todo SPT.
- Actualmente el SPT utiliza una configuración en malla, conexiones exotérmicas y calibre de conductor 2/0 AWG, cumpliendo con los requerimientos de materiales y de construcción del Artículo 15 del RETIE para sistemas de puesta a tierra.
Esto garantiza que los valores de resistencia obtenidos se pueden comparar con los valores máximos, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552. El cumplimiento de las normas garantiza que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir una falla, evitar que personas entren en contacto con la misma, debido a queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales tolerables del ser humano.

Recomendaciones:

- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos, bajo el cumplimiento de los lineamientos en la norma IEEE 80, como también deben definir un estado óptimo del sistema bajo prueba ya que si en una inspección muestra que se requieren reparaciones, estas deben ser realizadas sin retraso y no ser pospuestas hasta el próximo ciclo de mantenimiento. Los trabajos de inspección y mantenimiento deben garantizar una continua actualización del SPT para el cumplimiento del RETIE.

- **5.16 EDIFICIO 14**

Conformado por la Facultad de Ciencias de la Salud + Sede de Ciencias Clínicas.



Imagen 47. Edificio 14 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.16.1 Edificio de Medicina

Edificio No.14, lado izquierdo centro de sur a norte, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Imagen 48. Lugar de la medición del SPT del Edificio de Medicina.

Registro fotográfico del estado actual del SPT del edificio de Medicina



Imagen 49. Estado del SPT del Edificio de Medicina.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	1.37 Ω
Ver Anexo 24	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo X	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 24).
- La profundidad del cable de la malla no supera los veinticinco (25) centímetros.
- Falta señalización para el SPT, para evitar el paso de personas sobre este elemento este elemento de protección ya que, si se llega a ocurrir un fallo evitar que personas entren en contacto con la misma, tanto en el interior como en el exterior, queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad del ser humano.

Recomendaciones

- Se debería estudiar la posibilidad de evaluar la protección contra descargas eléctricas atmosféricas (evaluar NTC 4552- 1642). También se debe estudiar con más detenimiento las conexiones equipotenciales del área o del salón donde se encuentran los servidores.
- Es necesario revisar las uniones del sistema de puesta a tierra, debido que al hacer la inspección se encontró un cable reventado y esto es causa de un mal funcionamiento del sistema, sin mencionar el riesgo al cual están sometidos los equipos electrónicos y las personas.
- Realizar un estudio de mantenimiento, para garantizar la seguridad de las personas, de la máxima energía eléctrica conducida a través del cuerpo humano, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas, como se describe en el artículo 15 del RETIE, además deben de cumplir con los criterios propuestos, bajo el cumplimiento de los lineamientos en la norma IEEE 80, como también deben definir un estado óptimo del sistema bajo prueba ya que si en una inspección muestra que se requieren reparaciones, estas deben ser realizadas sin retraso y no ser pospuestas hasta el próximo ciclo de mantenimiento. Los trabajos de inspección y mantenimiento deben garantizar una continua actualización del SPT para el cumplimiento del RETIE.

- **5.17 EDIFICIO 15**

Conformado por Bloque A (Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico) , Bloque B (Salones de Clases), Bloque C (Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices), Bloque D (Salones de Clases) y Bloque E (Salones de Clases)



Imagen 50. Edificio 15 según el Mapa Esquemático de la UTP.

5.17.1 Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico.

Edificio No.15, sótano Bloque A, según el Mapa Esquemático Y Explicativo de la Universidad Tecnológica de Pereira.

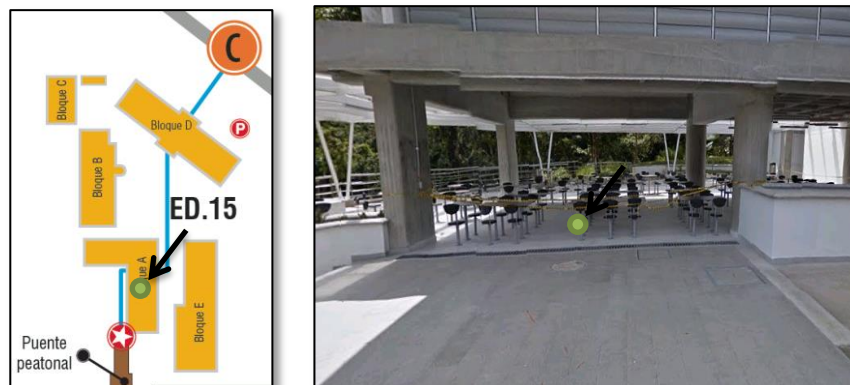


Imagen 51. Lugar de la medición del SPT del Centro de Innovación

Registro fotográfico del estado actual del SPT del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico



Imagen 52. Estado del SPT del Centro de Innovación.

Método para la medida de la resistencia de puesta a tierra:	Caída de potencial
Valor de la resistencia:	2.37 Ω
Ver Anexo 25	
Método para la medida de la resistividad del suelo:	Wenner
Ver Anexo Y	

Observaciones

- Se anexa protocolo de la medida de la resistencia del sistema puesta a tierra (Anexo 25).
- Este edificio no cuenta con mediciones de SPT o datos registrados anteriormente, ya que la construcción del edificio es reciente.
- El SPT de este edificio no cuenta con puntos de inspección y la malla de puesta a tierra se encuentra a 3 metros de profundidad bajo concreto, por lo que al tomar el valor de resistencia del SPT solo se contó con la puesta a tierra del banco de celdas y el transformador de la subestación de dicho edificio.
- Actualmente el SPT utiliza una configuración en malla, conexiones exotérmicas y calibre de conductor 2/0 AWG, cumpliendo con los requerimientos de materiales y de construcción del Artículo 15 del RETIE para sistemas de puesta a tierra. Esto garantiza que los valores de resistencia obtenidos se pueden comparar con los valores máximos, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552. El cumplimiento de las normas garantiza que las tensiones de

paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas.

Recomendaciones:

- Los puntos de inspección del SPT de este edificio deben quedar accesibles luego de la culminación de la construcción en proceso de los bloques B, C, D y E, que faciliten una fácil inspección con fines de mantenimiento o mediciones requeridas.
- Los futuros sistemas de puesta a tierra de esta edificación deben mantener una conexión equipotencial que garantice la buena actuación de las protecciones y condiciones de seguridad para los integrantes del campus universitario. Dicha conexión se debe realizar bajo el nivel del suelo (puesta a tierra), mediante soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo conforme a la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.

CAPITULO 6

• 6.1 EQUIPO UTILIZADO EN EL ESTUDIO.

El equipo utilizado para realizar el estudio de los sistemas de puesta a tierra, es:

- DIGITAL GROUND RESISTENTE TESTER
- Fabricante: AEMC® Instruments
- Modelo: 4500
- Serie: 12G36572

Las características técnicas del equipo se detallan en el Anexo: Z.



Imagen 53: Detalla del equipo AEMC 4500 y accesorios

Este equipo fue asignado al programa de Tecnología eléctrica, por parte de la Universidad Tecnológica de Pereira, para que desarrollara específicamente el estudio de los sistemas de puesta a tierra.

Para iniciar el trabajo se hizo necesario verificar el estado de calibración del equipo, para tal efecto se envió a el laboratorio de calibración “Sistemas e Instrumentación S.A”, compañía que asegura el

CAPITULO 7

• 7.1 BIBLIOGRAFIA

[1] MANUAL DE TECNICAS EN MEDICION DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Pedro Alejandro Vargas Avila - Universidad de la Salle - Facultad de Ingeniería Eléctrica - Santafé de Bogotá, d.c. 2000.

[2] AEMC INSTRUMENTS, Ground resistance measurements. Boston: AEMC Instruments. 1998. 36 p.

[3] AIEE No. 81. Recomendado guide for measuring ground resistance and potential gradients in the earth. New York: American Institute of Electrical Engenieers. May 15, 1962. 18 p.

[4] BIDDLE INSTRUMENTS, Getting donw to the earth. Pensylvania: Biddle Instruments. 1982. 46 p.

[6] CASAS, Favio. Tierras Soporte de la Seguridad Eléctrica. Santafé de Bogotá: Segelectrica 1998. 173 p.

[7] DIN VDE 0141/2.64. Regulations for earthings in A.C. installations with rated voltages above 1 kV. 1964. 110 p.

[8] GARCIA M, Rogelio. La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T. Madrid: Marcombo. 1991. 158 p.

[9] JORGE HUMBERTO SANZ ALZATE. Estudio De Los Sistemas De Puesta A Tierra De La Universidad Tecnológica De Pereira. Pereira (Colombia), 2003.

[10] CARDONA. CRISTIAN; ROMERO ALEJANDRO. Estudio de los sistemas de puesta a tierra de los edificios de: medio ambiente, comunicaciones, educación, cafetería central, sistemas, y ciencias básicas de la universidad tecnológica de Pereira (Colombia), 2003.

[11] LOAIZA. DANIEL; RAGA. ANDRES. Inspección de los sistemas de puesta a tierra de los edificios de medicina, biblioteca, planetario, química, mecánica y eléctrica ubicados en la universidad tecnológica de Pereira (Colombia), 2013.

[12] CARDENAS. LINA. Estudio de los sistemas de puesta a tierra de los edificios de: bellas artes, centro multidisciplinario, industrial, administrativo, bienestar universitario y centro de innovación y desarrollo tecnológico de la universidad tecnológica de Pereira (Colombia), 2003.