

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRICISTA



PROYECTO INTEGRADOR

“COMPORTAMIENTO Y VALIDACIÓN DE MODELOS A ESCALA DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA”

AUTORES:

CHEBLE, José
FRASCELLA, Fabio

DIRECTOR:

Ing. YBAÑEZ, Fernando

Córdoba, Marzo de 2016

Agradecimientos:

***“A nuestras familias,
en especial a nuestros padres
por su apoyo incondicional,
a nuestros amigos y compañeros
con quienes transitamos juntos esta carrera,
y a nuestro director de escuela
por el apoyo brindado durante todo el proyecto,
simplemente gracias”***



Contenido

INTRODUCCIÓN.....	7
-------------------	---

CAPITULO 1:

1. MARCO TEÓRICO: CONCEPTOS, DEFINICIONES.....	11
1.1. SUBESTACIONES TRANSFORMADORAS.....	11
1.1.1. Tensiones.....	11
1.1.2. Clasificación de los Centros de Transformación.....	12
1.1.3. Finalidad de las Subestaciones Transformadoras.....	12
1.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT).....	12
1.2.1. Conceptos y Definiciones de Sistema de Puesta a Tierra.....	13
1.2.2. Funciones y Objetivos de un Sistema de Puesta a Tierra.....	14
1.2.3. Elementos Constitutivos de un Sistema de Puesta a Tierra.....	15
1.3. RESISTIVIDAD (P).....	26
1.3.1. Concepto y Definición de Resistividad.....	26
1.3.2. Factores que Intervienen en la Resistividad.....	27
1.3.3. Métodos de Medición de la Resistividad.....	28
1.4. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA (RPAT).....	32
1.4.1. Concepto y Definición de Resistencia de Puesta a Tierra.....	33
1.4.2. Métodos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra.....	34
1.4.2.1. Método de Caída de Potencial.....	34
1.4.2.2. Otros Métodos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra.....	40
1.5. Teorías de Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra.....	41
1.6. POTENCIALES Y GRADIENTES.....	44
1.7. SEGURIDAD PARA PERSONAS Y ANIMALES EN SPTS.....	48
1.7.1. Límites Admisibles de Tensión para el Cuerpo Humano.....	48
1.7.2. Resistencia del Cuerpo Humano.....	50
1.7.3. Relación del Gradiente de Potencial con las Tensiones de Paso y Contacto.....	52



CAPITULO 2:

1. PARÁMETROS DE LOS SUELOS.....	55
2. LOESS, SUELO CARACTERÍSTICO DE CÓRDOBA.....	56
2.1. CONDUCCIÓN ELÉCTRICA DE LOS SUELOS.....	58
2.2. PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LOS SUELOS Y RESISTIVIDAD.	61
2.2.1. Variación de los Parámetros con Respeto a la Frecuencia.....	62
2.2.2. Porcentaje de Humedad en los Suelos.....	63
2.2.3. Temperatura en los Suelos.	64
2.2.4. Concentración de Sales Disueltas.....	65
2.2.5. Variación de la Resistividad según la Granulometría.....	66
2.2.6. Estratigrafía.....	66
2.2.7. Composición del Terreno.	66
2.2.8. Sales Solubles y Concentración de las Mismas.....	67
2.2.9. Compactación.	69
2.3. POLARIZACIÓN.....	69

CAPITULO 3:

1. PERFIL DE RESISTIVIDAD DEL SUELO LOÉSSICO SEGÚN EL CONTENIDO DE SALES DISUELTAS.....	76
2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD Y SALES EN EL SUELO LOÉSSICO EXTRAÍDO.	76
2.1. PREPARACIÓN DE MUESTRA.	76
2.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SALES.....	78
3. DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA SALINIDAD EN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	79
3.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ENSAYO.....	79
3.2. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE LAS MUESTRAS.	84
3.3. CONCLUSIONES ACERCA DE LAS MEDICIONES REALIZADAS.....	86



CAPITULO 4:

1. INTRODUCCIÓN A LA MODELIZACIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO.	88
2. DEFINICIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO.	88
2.1. CAJÓN IMPERMEABLE.	88
2.2. ELECCIÓN DEL MODELO DE SUELO (MODELO DE SUELO UNIFORME).	89
2.2.1. Alteración del Modelo de Suelo Uniforme.	90
2.3. LIMITACIONES DIMENSIONALES DE LOS MODELOS DE SPT.	93
2.3.1. Dimensiones de los Modelos a Escala de los SPT.	94
2.4. ENSAYO DE HUMEDAD.	97
2.5. COMPACTACIÓN DEL SUELO LOÉSSICO.	101
2.6. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD.	102
2.6.1. Método de Medición: Calicata Eléctrica.	103
2.6.2. Aplicación Práctica de la Calicata Eléctrica.	104
2.6.3. Interpretación de las Mediciones Obtenidas.	106
3. CONCLUSIONES.	109
3.1. RESISTIVIDAD.	109

CAPITULO 5:

1. ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.	111
2. TC1206.	111
3. MODELO A ESCALA.	111
3.1. MODELOS A ESCALA DEL TC1206.	111
3.2. ELECCIÓN DE LA ESCALA.	112
3.3. DIMENSIONES REALES Y ESCALADAS.	113
3.4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA.	113
3.4.1. Conductor de la Malla del SPT.	113
3.4.2. Jabalina del SPT.	114
3.4.3. Conexión/Unión del Conductor con la Jabalina Modelo.	119
3.5. SPT MODELO.	119
4. TEORÍAS DE CÁLCULO DE MODELOS DE SPT.	120
4.1. CALCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DEL ELECTRODO TIPO JABALINA. ...	121
4.2. CALCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DEL ELECTRODO TIPO MALLA.	126
4.3. CALCULO DE RESISTENCIA TORAL DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.	128



5. INSTALACIÓN DEL MODELO A ESCALA DENTRO DEL ENTORNO DE TRABAJO.	130
6. MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA. MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL.	132
6.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN. ESQUEMAS DE CONEXIÓN.	135
6.2. PRECAUCIONES A TENER EN CUENTA ANTES DE EFECTUAR LA MEDICIÓN.	138
6.3. PROCEDIMIENTO.	142
6.4. COMPARACIÓN DE VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS DE RESISTENCIA DE PAT.	146
7. EXTRAPOLACIÓN DE RESULTADOS A SPT UTILIZADOS EN SUBESTACIONES BIPOSTE.	148

CAPITULO 6:

1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS SPT DEL TC1206.	151
1.1. SECCIÓN NOMINAL Y MATERIAL DEL CONDUCTOR DEL TC1206.	151
1.1.1. Verificación de la Sección del Conductor.	152
1.2. DIMENSIONES DEL TC1206.	157
1.3. FORMA DEL TC1206.	158
1.3.1. Verificación de las Tensiones de Paso y de Contacto para el TC1206.	158
1.4. PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO DEL TC1206.	161
1.5. RESISTENCIA DEL TC1206.	163
2. CONCLUSIONES FINALES SOBRE EL TC1206.	167
2.1. TC1206 TIPO URBANO.	167
2.2. TC1206 TIPO RURAL.	168
3. CONCLUSIONES FINALES SOBRE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS.	168
3.1. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD. CALICATA ELÉCTRICA.	168
3.2. MEDICIÓN DE RESISTENCIA. MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL.	169
4. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS.	169

ANEXO I:

MEDICION DE SALINIDAD.	174
-------------------------------	------------

ANEXO II:

MEDICIONES DE RESISTIVIDAD. CALICATA .	195
---	------------



ANEXO III:	
MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	200
ANEXO IV:	
POLARIZACIÓN.	199
ANEXO V:	
MEMORIA DE CALCULO TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO.....	203
ANEXO VI:	
EPEC: TC1206, (1978).....	203
BIBLIOGRAFÍA:.....	217



INTRODUCCION:





Introducción.

El presente Proyecto Integrador es una continuación del Trabajo Final de grado realizado por Talocchino-Lozano, (2015), el cual consistió en el estudio y validación de un sistema de medición a escala para suelo loésico.

La finalidad del presente Proyecto Integrador es estudiar y verificar el comportamiento a frecuencias industriales (50Hz) de los sistemas de puesta a tierra (de ahora en más SPT) utilizados por la E.P.E.C., como por otras empresas y cooperativas distribuidoras de energía del país (EC SAPEM de Catamarca y Enersa de Entre Rios, por citar algunas), en subestaciones transformadoras aéreas, del tipo biposte y monoposte, correspondientes al tipo constructivo **TC1206** de dicha empresa, por medio de la técnica de modelización a escala validada por Talocchino-Lozano, (2015).

La técnica de modelización a escala utilizada, brinda la posibilidad de poder profundizar en la verificación del comportamiento de los SPT mencionados, dado que en la actualidad no existe una memoria de cálculo que valide estos tipos constructivos respecto de otras alternativas. Cabe mencionar también que no existe demasiada información sobre el origen de este tipo constructivo, el cual está en vigencia sin modificaciones desde el año 1978. Por otro lado, debido a su uso extendido en zonas urbanas donde estos sistemas se encuentran en contacto directo con las personas, surge la necesidad de hacer un análisis más profundo, velando por la seguridad de las personas e instalaciones. Es entonces, por los motivos expuestos que se decidió la elección del tema para realizar el presente trabajo.

Se realizara también una comparación de los resultados obtenidos a partir de las mediciones efectuadas al modelo con los resultados teóricos arrojados por distintas teorías de cálculo comúnmente empleadas, con la intención de identificar cuál de estas teorías representa mejor el comportamiento del SPT bajo estudio.

Asimismo, se complementara el trabajo de Talocchino-Lozano, (2015) estudiando el comportamiento de los parámetros eléctricos relevantes antes citados en función del contenido de salinidad del suelo.



Alcances:

Debido a la gran cantidad de temas que se pueden desarrollar con respecto a los SPT, el alcance del Proyecto Integrador se encuentra definido dentro de las siguientes características:

- El medio de trabajo donde se realizarán las distintas mediciones, será un suelo loésico característico de la región céntrica del país, donde se encuentra ubicada la Ciudad de Córdoba;
- El estudio del comportamiento de los SPT se llevará a cabo en función de aquellas anomalías, fallas o fenómenos perjudiciales que se desarrollan a frecuencias industriales y no para aquellos fenómenos rápidos, que se generan a muy altas frecuencias, tales como las descargas atmosféricas, los transitorios y las descargas impulsivas;
- Los SPT adoptados para estudiar y analizar su comportamiento, serán los descritos en el TC1206 de la E.P.E.C. aplicables a Subestaciones Transformadoras Aéreas Biposte y Monoposte.

Objetivos:

El encuadre del Proyecto Integrador, tiene como intención cumplir con los objetivos que se describen según el orden que se indica a continuación:

- 1) Estudiar las condiciones actuales del entorno de trabajo donde se realizaran las mediciones de los modelos a escala de los SPT bajo estudio;
- 2) Construir un modelo a escala adecuado de los SPT mencionados para su posterior estudio frente a los fenómenos que los rigen, en función de aquellas mediciones características que definen a dichos sistemas;
- 3) Realizar a través del método de medición citado anteriormente mediciones sobre estos modelos a escala;
- 4) Comparar los valores medidos de la Resistencia de Puesta a Tierra de los sistemas en estudio con respecto a distintas teorías de cálculo convencionales;
- 5) Adoptar una teoría de calculo que sea capaz de representar el comportamiento de los SPT estudiados;
- 6) Realizar un estudio que permita determinar y cuantificar la influencia que tiene la salinidad contenida en el suelo, sobre los parámetros eléctricos característicos.



Hipótesis:

El desarrollo del Proyecto Integrador se encuentra sujeto al sistema de medición a escala validado por Talocchino-Lozano (2015), por lo que las hipótesis adoptadas serán las mismas, citadas a continuación:

- El suelo loésico representará las condiciones de obra. Es decir, que el grado de humedad y de compactación será constante, y sus valores estarán dentro de los parámetros de aceptación definidos por las normas de obras civiles, que establecen valores relacionados con respecto a los obtenidos en el ensayo Proctor¹ de dicho suelo.
- El Comportamiento de los SPT, será estudiado únicamente para aquellos fenómenos que se originan en torno a frecuencias industriales;
- La validación de la técnica de modelización a escala, será evaluada comparando los resultados obtenidos en las distintas mediciones, con respecto a los valores característicos del comportamiento real de los SPT que se evidencian en la teoría.

¹ Proctor: ensayo de compactación normalizado.



CAPITULO 1:





1. Marco Teórico: Conceptos, Definiciones.

El primer capítulo de este Proyecto Integrador estará destinado a dar un marco teórico de los temas relevantes para poder abordar así posteriormente el estudio propuesto. Haremos referencias a normas vigentes y a estudios anteriores que hayan abordado la misma temática. Se darán conceptos, definiciones y características acerca de los sistemas de puesta a tierra tradicionalmente instalados en subestaciones transformadoras.

1.1. Subestaciones Transformadoras.

Los sistemas eléctricos de producción, transporte, distribución y alimentación a los receptores (consumidores) de energía eléctrica, funcionan prácticamente siempre en corriente alterna trifásica.

De la fórmula de la potencia en corriente alterna trifásica $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$, se aprecia que para cualquier potencia que se considere, la intensidad y la tensión están en relación inversa.

Técnicamente hablando, existen límites para el valor de corriente que puede circular por los conductores, para conectar y desconectar líneas a través de aparatos de maniobra, y controlar con transformadores de medida, etc. Por tanto a medida que entran en consideración potencias más elevadas, se hace necesario utilizar también tensiones cada vez mayores, a fin de poder mantener la corriente dentro de unos límites técnica y económicamente admisibles. Es entonces esta la finalidad de las estaciones transformadoras, elevar y disminuir la tensión para realizar un tendido eléctrico lo más eficientemente posible.

1.1.1. Tensiones.

Las tensiones se clasifican según el manual técnico de Schneider para centros de transformación de media y baja tensión en tres categorías:

- Baja tensión (BT): para valores de hasta 1000 V.
- Media tensión (MT): valores mayores a 1000 V e inferiores a 50000 V.
- Alta tensión (AT): valores superiores a los 50000 V.

Las estaciones sobre las que se hará énfasis en el presente proyecto integrador son aquellas estaciones transformadoras que se utilizan como estaciones reductoras de tensión, conocidas como **subestaciones transformadoras**. Estas estaciones transforman tensiones de 13200 V a 220/380 V. por tanto es una estación transformadora de media a baja tensión (MT/BT).



1.1.2. Clasificación de los Centros de Transformación.

Se pueden clasificar los centros de transformación según varios aspectos:

- Por la acometida de transformación (AT, MT, BT).
- Según las normas técnicas de edificación (interior, exterior, aérea, subterránea, a nivel).

Bajo estas clasificaciones, podemos decir que nuestro centro de transformación es del tipo aéreo y exterior.

Generalmente las subestaciones transformadoras de este tipo, se distinguen o subdividen en grupos según la cantidad de apoyos que sostengan al transformador propiamente dicho, y donde estén ubicados todos los elementos necesarios para maniobrar en ella. De aquí que se desprenden las del tipo monoposte que utilizan un solo apoyo, y las de tipo biposte para dos apoyos. En casos excepcionales se pueden encontrar subestaciones con más de dos apoyos, pero las mismas no están contempladas en las normativas de la EPEC.

1.1.3. Finalidad de las Subestaciones Transformadoras.

Cuando se trata de alimentar a diversos abonados en BT, la empresa distribuidora, en este caso la EPEC, instala un centro de transformación de potencia adecuada al consumo previsto del conjunto de abonados. Este centro de transformación que generalmente se ubica en la vía pública sirve para reducir niveles peligrosos e impracticables de tensión para el usuario común. Es decir, reduce como se dijo antes de media tensión a baja tensión, siendo esta última la utilizada por los usuarios (220 V de tensión entre fase y neutro y 380 V tensión entre líneas). Es entonces la finalidad de la subestación transformadora el suministro y distribución de energía eléctrica para los pequeños consumidores.

1.2. Sistema de Puesta a Tierra (SPT).

En general "poner a tierra", significa establecer una unión eléctricamente conductora entre un material conductor metálico y la tierra.

Como tierra se entiende, además del suelo en sentido genérico, los elementos que componen el terreno: arena, arcilla, granza.

En relación con el diseño de una toma de tierra intervienen dos factores:

- La Resistencia de la Toma a Tierra.



- La Resistividad del terreno.

La difusión de la corriente queda determinada por la resistencia de su pasaje a tierra y el cono de distribución de tensión.

Debe tenerse en cuenta que no es posible hacer pasar bruscamente la corriente, desde la reducida sección de un conductor metálico de buena conductividad (como podía ser por ejemplo cobre 35 a 50 mm² que tiene un diámetro entre 7 y 9 mm aproximadamente) a una sección de terreno pequeña debido a que la tierra es en esencia un mal conductor.

Por lo tanto, se debe ofrecer al paso de la corriente una sección de contacto suficientemente grande.

En definitiva, la forma que se adopte para la toma de tierra y la extensión de su superficie de contacto, así como la resistividad del terreno, son los parámetros que determinan la difusión de corriente en el suelo.

1.2.1. Conceptos y Definiciones de Sistema de Puesta a Tierra.

Según la AEA 90364-7-771, (2006), la puesta a tierra de una instalación comprende toda unión conductora ejecutada en forma directa sin fusible ni protección alguna, y de sección suficiente entre las masas eléctricas de la instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el terreno.

El propósito de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) es de derivar hacia la misma, los efectos de la corriente de falla originada por fenómenos naturales o factores propios de dicha instalación.

El valor de la resistencia de la toma a tierra (o de la puesta a tierra) deberá satisfacer las condiciones de protección y/o de servicio (o funcional) de la instalación eléctrica.

1) Puesta a tierra de protección: es la puesta a tierra de uno o más puntos de una red, una instalación o de un equipo o material por razones de seguridad eléctrica.

2) Puesta a tierra de servicio (o funcional): es la puesta a tierra de uno o más puntos de una red, de una instalación o de un equipo o material por razones distintas a las de la seguridad eléctrica.

3) Puesta a Tierra Unificada: Según la AEA en su “tratamiento de neutro y puesta a tierra”, modulo 6, (2012) es necesario considerar en que ambas funciones puedan ser desempeñadas por una misma instalación de puesta a tierra.



En el caso de los centros de transformación MT/BT o MT/MT, habrá un lado que recibe alimentación de una red externa, y otro lado en que el centro será la fuente. Por lo tanto en este se debe establecer la puesta a tierra del sistema abastecido, como también ofrecer un camino a tierra a las corrientes de falla que se pudieran producir entre los conductores activos de este lado y las masas.

Por otra parte en ciertos casos la línea de alimentación que vincula la fuente con las instalaciones abastecidas incluye un conductor conectado al punto de referencia puesto a tierra de la fuente. Tal es el caso de las pantallas de cable de MT, a efectos de asegurar el confinamiento de campo eléctrico en el cable, como el caso de líneas aéreas de MT (o subterráneas en algunos países) donde se utiliza como neutro para retorno de las corrientes de desequilibrio.

Todo Sistema de Puesta a Tierra, (en adelante SPT) debe satisfacer distintas funciones y objetivos, como los que se comentan a continuación.

1.2.2. Funciones y Objetivos de un Sistema de Puesta a Tierra.

Un SPT confiable debe cumplir con diferentes funciones y objetivos.

Entre ellos, podemos citar lo expuesto por las normas IEEE Std 80, (2000), NFPA 70, NEC, (1999), AEA 90364-7-771, (2006), y la clasificación de funciones propuestas por el Ing. Arcioni, (2002), etc.

A continuación se describen cada una de estas funciones y objetivos.

- Conducir o derivar la corriente de falla a un punto de referencia de tierra, con suficiente capacidad, con el objeto de proteger el entorno que rodea, es decir tanto la vida de seres vivos, (personas, animales, etc.), como así también eliminar ó disminuir el riesgo perjudicial en instalaciones, máquinas y equipos eléctricos;
- Proveer seguridad para máquinas y equipos, asegurando el servicio continuo, limitando la tensión ante condiciones anormales o de falla, de manera que cualquier equipo conectado al sistema, solamente esté sujeto a un cierto nivel de tensión relativo a tierra.
- Estabilizar a valores normales la tensión durante los instantes de transitorios ó temporales (descargas eléctricas atmosféricas), para minimizar la posibilidad de arco por sobretensión en la red eléctrica;



- Fijar el nivel de sobretensión admisible y de este modo determinar la característica de las protecciones y su comportamiento;
- Eliminar las interferencias de origen externo (ruidos eléctricos), y servir de referencia al sistema eléctrico;
- Definir el régimen de puesta a tierra para el sistema eléctrico del país ó región, como también los niveles de corriente de cortocircuito y sobretensión admisibles.

1.2.3. Elementos Constitutivos de un Sistema de Puesta a Tierra.

La norma IEEE Std 80, (2000), define algunos de los elementos característicos de un SPT, como se expone a continuación:

- Electrodo de puesta a tierra:

Es un conductor incrustado en la tierra y se utiliza para recoger ó disipar la corriente hacia tierra.

También llamados dispersores, es un elemento que está en contacto con la tierra y es el que facilita que la descarga se distribuya rápidamente generando próximo a él, una *superficie equipotencial*.

Las Puestas a Tierra, Tomas de Tierra, Electrodo o Dispersores, son los componentes que en los sistemas de protección y seguridad, tienen por objeto dispersar o difundir la corriente en tierra.

Los Dispersores son en general elementos metálicos de diversa forma y características constructivas que se entierran en el suelo y se hallan en unión conductora con el terreno.

- Electrodo de puesta a tierra primario (TIPO):

Es un electrodo de puesta a tierra específicamente diseñado o adaptado para descargar la corriente de falla a tierra, por lo general en un patrón de descarga específico, según sea necesario (o implícitamente demandado) por el diseño del sistema de puesta a tierra.

- Electrodo de puesta a tierra auxiliar:

Es un electrodo de puesta a tierra con ciertas limitaciones de diseño o de funcionamiento. Su función primaria puede ser otra que la conducción de la corriente de falla a tierra.



- Malla de puesta a tierra:

Puede pensarse como un sistema de electrodos horizontales que consta de un número de conductores desnudos interconectados y enterrados, proporcionando una base común para los dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, por lo general se encuentran en una ubicación específica.

Cuando se desea lograr un determinado valor de resistencia de tierra, por razones particulares o por dureza del terreno, se puede recurrir a sistemas combinados, es decir, utilizar dos o tres tipos distintos. Por ejemplo, es común emplear una red mallada, y mejorar la resistencia a tierra paulatinamente, agregando jabalinas en los vértices de la malla y en otros puntos de la misma.

- Placa metálica equipotencial:

Es una placa metálica sólida o un sistema de conductores desnudos estrechamente espaciados, que se conectan y se ubican generalmente a poca profundidad, por encima de la malla de puesta a tierra o de cualquier otro lugar de la superficie de la tierra, con la finalidad de obtener una medida de protección adicional, minimizando el peligro a la exposición de la tensión de paso ó de contacto en un área de operación crítica o en lugares muy transitados por la gente. Rejas metálicas conectadas a tierra, colocadas sobre o por encima de la superficie del suelo, o mallas de alambre colocadas directamente bajo la superficie del terreno, son formas comunes de una malla de puesta a tierra equipotencial.

Este tipo de dispersores a placa no son generalmente usados para tomas de tierra, hay que considerar su elevado costo.

Presentan la ventaja de su gran superficie de contacto con tierra, Se puede recurrir a su empleo cuando a poca profundidad aparecen estratos de mucha dureza y no es conveniente o posible el uso de jabalinas.

- Conductor de puesta a tierra:

Conductor que está fuera del suelo o colocado aislado dentro del suelo y que comunica una parte de una instalación que debe conectarse a tierra con un electrodo de tierra.



- Electrodo dispensor o de puesta a tierra o “toma de tierra”:

Conductor enterrado y conectado eléctricamente mediante una unión íntima y conductora al suelo. También puede estar embutido o embebido en hormigón que a su vez esté en contacto íntimo con el suelo en una superficie grande. Las partes desnudas (no aisladas) de las conexiones enterradas, se consideran como parte del electrodo dispensor.

- Otros tipos de Electroodos o de Dispersores:

1. De bandas o Contrapesos
2. En bucle
3. En estrella

1) **Dispensor de Banda o Contrapeso:** Consiste en un conductor o pletina colocada horizontalmente a escasa profundidad bajo nivel del suelo (0,5 a 1 metro). Estos dispersores son principalmente empleados para protección de grandes superficies, como ser instalaciones de maniobras exteriores: zonas de tableros, subestaciones transformadoras.

También constituyen una solución, incluso para el caso de edificios, cuando se tienen suelos que no admiten mucha profundidad den enterramiento o por su calidad pedregosa o rocosa.

Con este tipo de bandas se puede rodear el perímetro de un edificio, y se presta para la combinación con otros dispersores, por ejemplo jabalinas.

Como material pueden emplearse flejes de acero de sección mínima 100 mm^2 , y espesor mínimo 13 mm, o bien cable galvanizado de alambres gruesos, de sección mínima de 95 mm^2 . También pueden utilizarse conductores de cobre desnudo de sección mínima 35 mm^2 , y cintas de cobre de 50 mm^2 de sección mínima y espesor mínimo 2 mm

Cualquiera sea el tipo de dispensor empleado, los mismos no deben recubrirse de pinturas aislantes o productos similares.

2) **Dispensor en Bucle:** Se puede considerar como una variante del dispensor de banda cerrado sobre sí mismo para formar un círculo, rectángulo u otra figura semejante. La resistencia aumenta ligeramente entre un 5% y un 8%.



3) **Dispensor de estrella:** Cuando los ramales de una toma de tierra de este tipo están próximos, la resistencia de contacto no disminuye proporcionalmente al largo y número de los ramales como se podría suponer. La variación lineal se mantiene aproximadamente cuando el ángulo entre los ramales no es inferior a 60° . Es decir que una toma de este tipo con más de seis ramales, no aporta sensibles mejoras al valor de resistencia de tierra.

Por último se insiste sobre el hecho de que un SPT puede estar constituido por uno o por varios electrodos de puesta a tierra, que no necesariamente tienen que ser de la misma tipología.

1.2.3.1. **Sistemas de Puesta a Tierra constituido por Jabalinas.**

Las jabalinas constituyen un tipo conveniente de electrodos de puesta a tierra, frente al resto de los modelos. Se tratan de dispersores en forma de barras cilíndricas lisas, de un cierto diámetro y longitud específica, poseen muy buenas propiedades eléctricas y por lo general están compuestas por un alma de acero, recubiertas con una capa de cobre. Son hincadas verticalmente, relativamente fáciles de instalar y pueden usarse para alcanzar en profundidad, capas de terreno de baja resistividad.

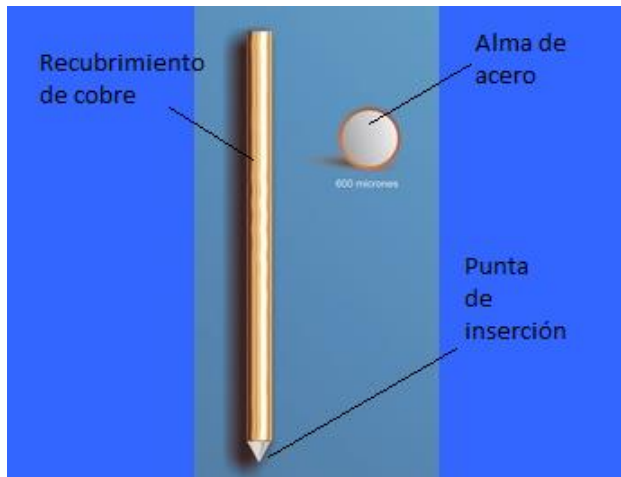
En nuestro país, básicamente la fabricación de la mayoría de estas jabalinas y sus respectivas dimensiones, se encuentran estandarizadas por la norma IRAM 2309-1, (2013), y poseen las características que se describen a continuación:

- **Alma de acero:** Habitualmente las jabalinas están construidas con barras cilíndricas de acero trefilado, (por lo general SAE 1010 a 1020), para obtener más resistencia y rigidez. Esto permite enterrarlas fácilmente con cualquier método convencional, (martillo liviano, martinets manuales, mecánicos o neumáticos, etc.), directamente en el terreno sin necesidad de una perforación previa.
- **Capa de cobre:** La capa constituye el revestimiento de cobre electrolítico con un 98% de pureza, de la barra de acero, obtenida mediante un proceso de electrodeposición, de modo de asegurar una unión inseparable y homogénea de los metales. Con una terminación brillante y libre de imperfecciones, la capa de cobre de la jabalina de puesta a tierra tiene un espesor rigurosamente controlado, siendo el espesor nominal del mismo, mayor a $250 \mu\text{m}$.
- **Perfecta unión cobre-acero:** La capa de cobre exterior está perfectamente unida al alma de acero, comportándose mecánicamente como un sólo metal. Se elimina así, la posibilidad de corrosión electroquímica y le da una excelente conductividad eléctrica. Esta capa forma un sólo cuerpo con su alma de acero de alta resistencia.

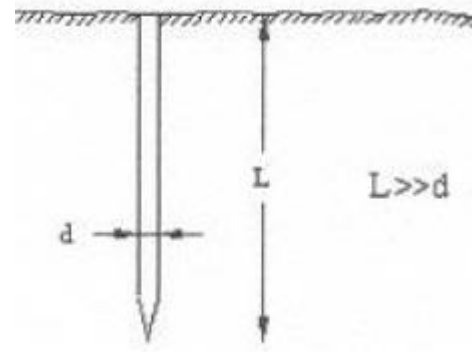


- Extremo en punta: El extremo inferior de las jabalinas es agudizado. La punta se saca en frío, pues preserva la dureza y resistencia de la misma.

En la figura 1.1, se puede apreciar con mayor claridad todas estas particularidades.



A) Características de Jabalina;



L: Longitud de Jabalina
D: Diámetro de Jabalina

B) Dimensiones de Jabalina;

Figura 1.1: Jabalina de Puesta a Tierra

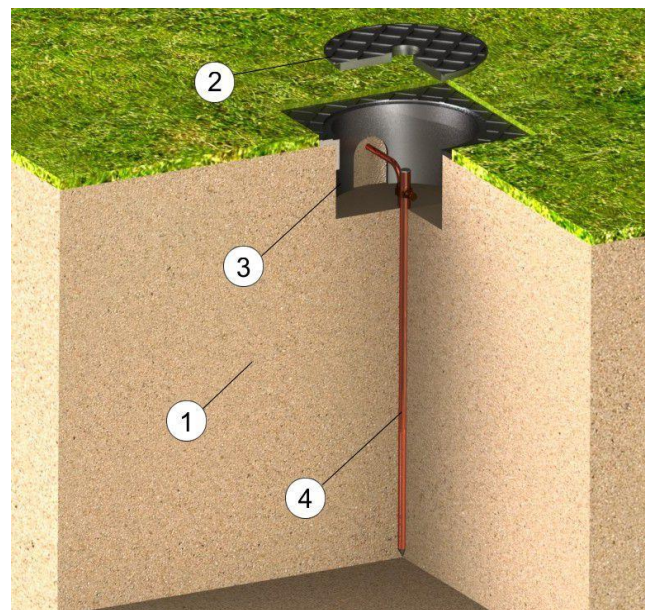
Comparadas con otros tipos de electrodos de puesta a tierra, las jabalinas tienen las siguientes ventajas:

- Exigen menor esfuerzo para ser enterradas, aún más si son cortas, por lo que resulta más económica la mano de obra necesaria para su instalación;
- Si la capa superficial del terreno es arenosa, y la capa de menor resistividad está a mayor profundidad, pueden introducirse hasta una profundidad tal que se reduzca mucho la resistencia de dispersión a tierra;
- Para un mejor aprovechamiento de un estrato o capa poco profundo con una resistividad relativamente baja, pueden introducirse de forma oblicua una o más jabalinas en un mismo lugar y conectarse en paralelo;
- La conexión entre una jabalina es sencilla y muy fácil de inspeccionar cuando es accesible, (cámara de inspección);
- Permiten, (en última instancia), un tratamiento químico.

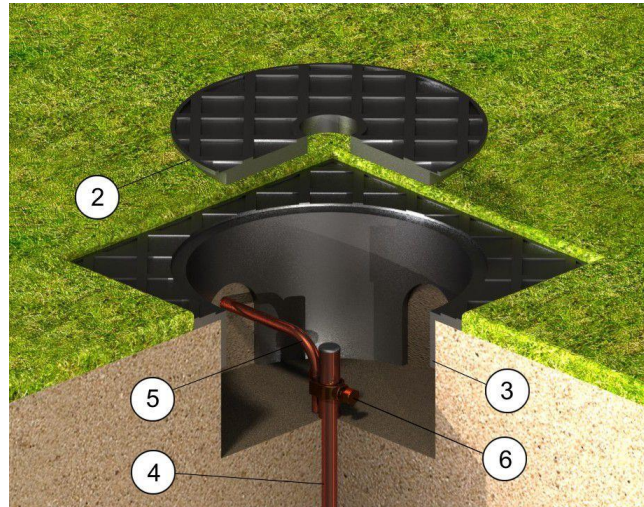
Un SPT constituido por una jabalina como el mostrado en la figura 1.2, consta de los siguientes componentes básicos:



- Conductor de puesta a tierra. Por lo general, se trata de un conductor desnudo de cobre, de sección nominal, formación y cantidad de hilos normalizados.
- Conexión/unión del conductor con la jabalina de puesta a tierra. Para obtener resistencias de contacto reducidas y durables, es esencial que estas conexiones sean resistente a las tensiones mecánicas (por ejemplo, a las variaciones de temperatura), y que eviten la corrosión resultante de los pares o cuplas galvánicas que se forman cuando dos metales diferentes están en contacto a través de una solución conductora electrolítica (como es el propio suelo). Por lo tanto, las mismas suelen ser realizadas a través de soldaduras cuproaluminotérmicas, o en su defecto, por soldaduras autógenas, por conectores de cobre a compresión por deformación plástica en frío, o por medio de tomacables de bronce o latón.
- La propia jabalina de puesta a tierra.
- Cámara de inspección. Frecuentemente, se suele instalar este tipo de recinto junto a su tapa de registro para que la inspección de dicho SPT sea accesible.



A) **Representación de SPT constituido por una Jabalina;**



B) Detalle de Cámara de Inspección y Conexión de Puesta a Tierra;

Figura 1.2: SPT constituido por una Jabalina

Referencias:

- 1- Volumen de suelo en estudio;
- 2- Tapa de registro de cámara de inspección;
- 3- Recinto de cámara de inspección;
- 4- Jabalina de puesta a tierra;
- 5- Conductor de puesta a tierra;
- 6- Conexión/unión realizada con toma cable de bronce o latón.

Cuando se trata de jabalinas cortas, es poco frecuente que una sola proporcione una resistencia de puesta a tierra suficientemente baja. Por lo tanto, un SPT alternativo, empleado para reducir dicha resistencia, es a través del uso de múltiples electrodos de tierra, donde más de una jabalina es instalada en el suelo y conectada en paralelo. En este sistema, hay que tener mucho cuidado con la distancia de separación entre jabalinas, dado que cada una de ellas posee su propia semiesfera equipotencial de influencia, (figura 1.3), y sin un espaciamiento adecuado dichas semiesferas se cruzan, produciendo interferencias y desaprovechando el sistema.

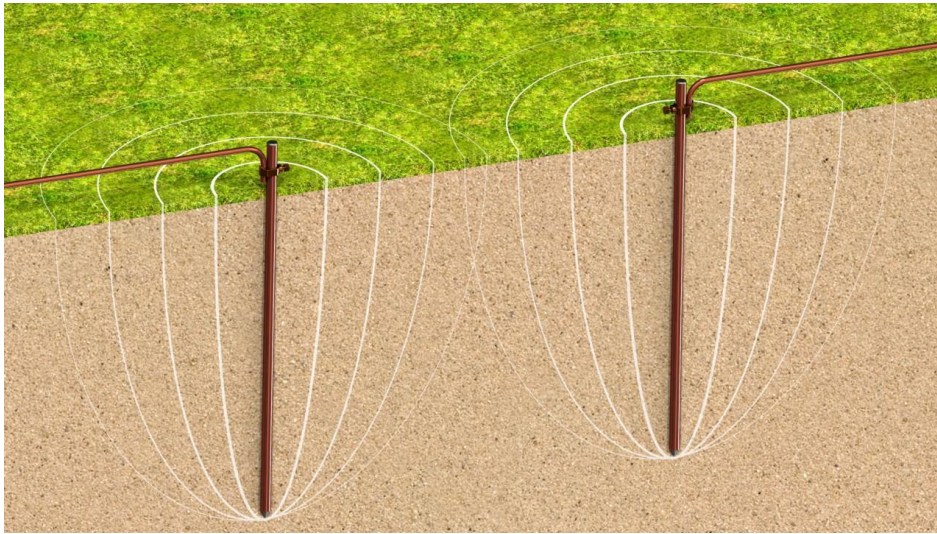


Figura 1.3: SPT de dos Jabalinas (Representación de semiesferas equipotenciales)

En particular, la norma IRAM 2281-1, (1996), expresa los siguientes párrafos con respecto al tema en cuestión:

Cuando se conectan varias jabalinas en paralelo se observa que la resistencia a tierra del conjunto es mayor que el valor teórico calculado como un simple paralelo de la resistencia de cada una de ellas. Esto se debe a la influencia de los campos eléctricos de la corriente de cada una de las jabalinas.

El aumento depende de la distancia entre jabalinas y del número de ellas que componen un Sistema de Puesta a Tierra. El empleo de conductores desnudos enterrados para la interconexión de las jabalinas, puede disminuir el valor de la resistencia a tierra total.

La figura 1.4 da una idea del aumento (porcentual) de la resistencia a tierra con respecto al valor teórico. Está basada en la hipótesis de que la resistividad del suelo es uniforme en todos los puntos de la zona considerada y en que entre todas las jabalinas de un sistema existe la misma separación.

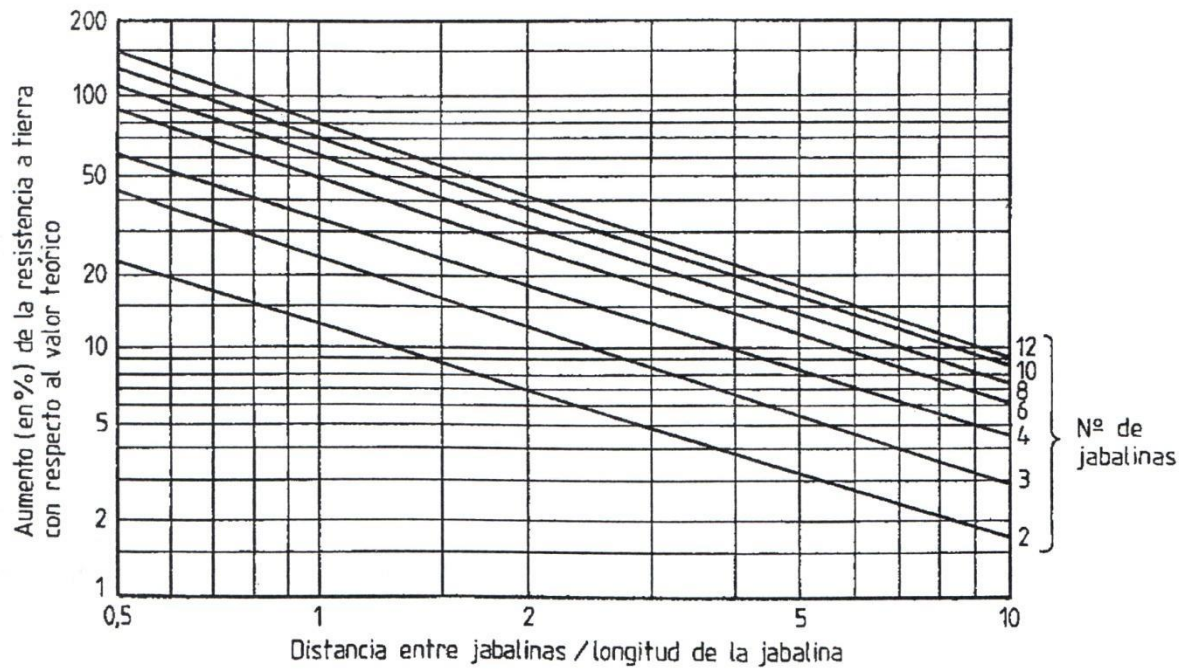


Figura 1.4: Interacción de varias Jabalinas en paralelo regularmente separadas entre sí. Extraído de norma IRAM 2281-1, (1996)



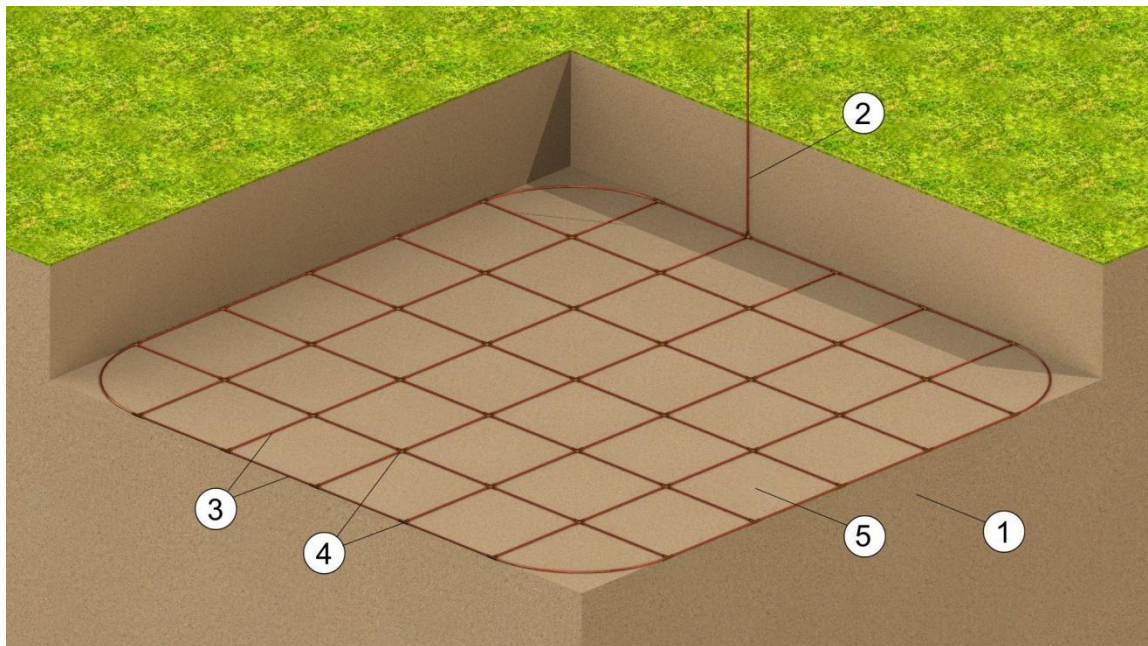
1.2.3.2. Sistemas de Puesta a Tierra Constituido por Mallas.

Las mallas se utilizan especialmente cuando el objetivo de la puesta a tierra es mantener un control de potencial en la superficie del terreno, asociado a un valor de resistencia de Puesta a Tierra relativamente bajo. Se tratan de conductores desnudos generalmente de cobre o de cierto material que posea muy buenas propiedades eléctricas, de la sección apropiada a la situación, interconectados entre sí mediante algún tipo de unión ó fijación especial, de modo tal que los mismos no pierdan sus características eléctricas, formando retículas de dimensiones específicas y que adoptan diferentes formas de diseño según la configuración del área a proteger. Son enterradas horizontalmente a una profundidad de entre 0,5 m y 1 m y tales electrodos hacen intervenir un gran volumen de terreno.

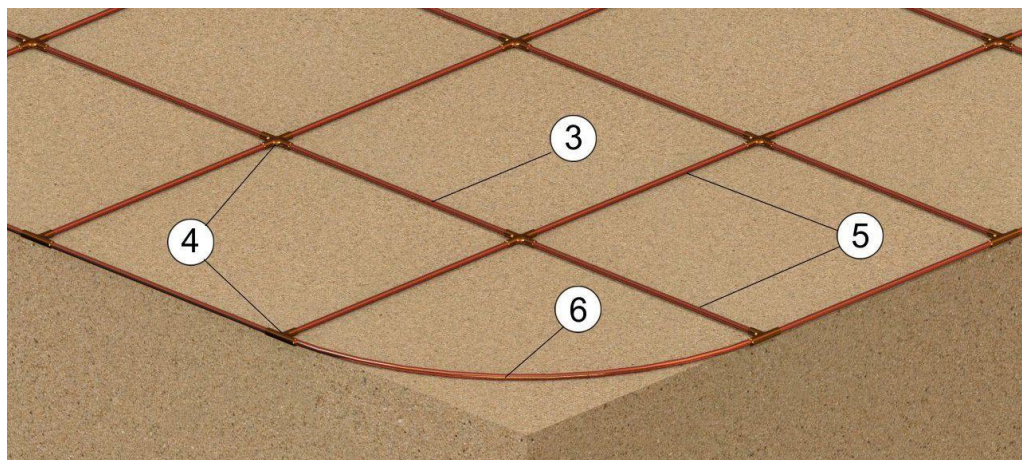
Un SPT constituido por una Malla (figura 1.5), generalmente consta de los siguientes componentes básicos:

- 1) Conductor de puesta a tierra. Por lo general, se trata de un conductor de cobre desnudo, de sección nominal, formación y cantidad de hilos normalizados.
- 2) Los propios conductores desnudos instalados horizontalmente, interconectados eléctricamente entre sí, formando diversas configuraciones.
- 3) Conexiones de los conductores entre sí, mediante algún tipo de unión ó fijación especial. Básicamente, son realizadas por medio de soldaduras cuproaluminotérmicas o por conectores a compresión por deformación plástica en frío (Tipo "T" o "X" según su configuración), para cumplir con los mismos objetivos descriptos anteriormente en los SPT constituidos por jabalinas.
- 4) Un reticulado de cierto diseño, instalado en forma horizontal y a una profundidad específica. Normalmente, en las retículas se trata de prevenir la formación de ángulos vivos, con el objetivo de evitar puntos de concentración de gradientes de potencial.

Por lo general, para disminuir aún más el valor de la resistencia de puesta a tierra, se pueden adherir jabalinas en distintos puntos de la malla, con el objetivo de conducir la corriente de falla con mayor capacidad.



A) **Representación de SPT constituido por una Malla;**



B) **Detalle de reticulado de Malla**

Figura 1.5: SPT constituido por una Malla



Referencias:

- 1- Volumen de suelo en estudio;
- 2- Conductor de puesta a tierra;
- 3- Conductores instalados horizontalmente, interconectados entre sí;
- 4- Conexiones realizadas con conectores de cobre o soldaduras cuproaluminotérmicas (Tipo "X" ó "T" según la configuración).
- 5- Reticulado en forma de cuadrículas de lados iguales;
- 6- Radio de curvatura, para evitar ángulos vivos en las retículas.

1.3. Resistividad (ρ).

1.3.1. Concepto y Definición de Resistividad.

La resistividad del suelo, se define como la resistencia específica del suelo propiamente dicho. Es decir, en términos eléctricos, la resistividad es la resistencia de cada material para oponerse al paso de la corriente eléctrica, y es equivalente a la resistencia eléctrica específica que existe entre dos caras opuestas de un cubo de volumen unitario (figura 1.6), tal como se demuestra a continuación:

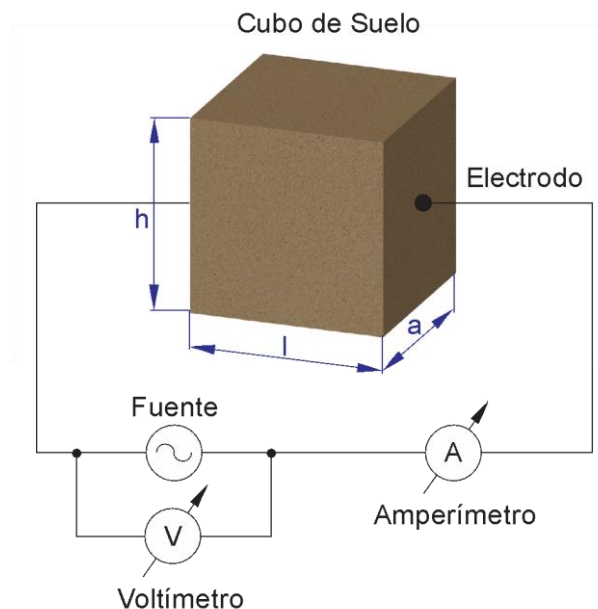


Figura 1.6: Esquema de medición de Resistividad de un cubo de volumen unitario



Partiendo de la expresión general de la resistencia, es decir:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{\rho \cdot l}{(h \cdot a)}$$

Dónde:

R : es la resistencia medida entre las dos caras opuestas del cubo, en $[\Omega]$;

ρ : es la resistividad del suelo entre las dos caras opuestas del cubo, en $[\Omega \cdot m]$;

l : es la distancia longitudinal entre las dos caras opuestas del cubo, en $[m]$;

S : es la sección transversal del cubo e igual al producto de la altura “ h ” por el ancho “ a ” de dicho cubo, en $[m \cdot m = m^2]$.

Considerando a la resistividad, podemos expresar que:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{R \cdot (h \cdot a)}{l} \quad \left[\frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right] = [\Omega \cdot m]$$

Según la norma IRAM 2281-1, (1996), la resistividad es la resistencia eléctrica específica de la tierra (suelo). Casi siempre se indica en $\Omega \cdot m^2/m = \Omega \cdot m$ y equivale a la resistencia de un cubo de $1m$ de arista medida entre dos caras opuestas del cubo.

Teniendo en cuenta esta definición y reemplazando en la expresión anterior, se tiene que:

$$\rho = \frac{R \cdot (1m \cdot 1m)}{1m} \quad \left[\frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right]$$

$$\rho = R \quad [\Omega \cdot m]$$

Donde finalmente, se deduce que la resistividad es igual a la resistencia eléctrica específica del suelo.

1.3.2. Factores que Intervienen en la Resistividad.

Según la norma IRAM 2281-1, (1996) la resistividad del suelo depende sobre todo del tamaño de las partículas que las componen, de la proporción de materias solubles y de su grado de humedad. El suelo se compone principalmente de óxido de silicio y de óxido de aluminio, que son buenos aislantes. La presencia de sales en estos dos óxidos reduce la resistividad.

La resistividad se debe por una parte a un proceso electrolítico y por otra, a la resistencia de contacto entre un gran número de finas partículas. Si el contenido de agua



retenida en el suelo o de sales es elevado, el fenómeno predominante será probablemente el proceso electrolítico; en cambio, si el proceso, es seco, los factores esenciales serán el tamaño de las partículas y el volumen de aire retenido en sus intersticios.

El tamaño del grano, su distribución y la compactación, son también factores influyentes, debido que controlan el modo en que la humedad se mantiene en el suelo. Muchos de estos factores varían localmente y algunos también varían con las estaciones.

En definitiva, entre los numerosos factores que determinan la resistividad del suelo, podemos mencionar a los siguientes:

- El tipo de suelo o terreno y su composición;
- La concentración de sales disueltas en el suelo, (*Salinidad*);
- El grado de humedad en el suelo, (*Humedad*);
- La compactibilidad y las presiones a las cual está sometido el suelo, (*Compactación*);
- La temperatura a la que se encuentra el suelo;
- La granulometría del suelo;
- La estratigrafía del suelo;
- Factores estacionales;
- Factores de origen eléctrico, entre otros.

Tales factores se verán con mayor profundidad en el próximo capítulo del presente Proyecto Integrador, cuando se estudien las características y propiedades de los suelos.

1.3.3. Métodos de Medición de la Resistividad.

Las técnicas para medir la resistividad del suelo son esencialmente las mismas cualquiera que sea el propósito de la medición. Sin embargo, la interpretación de los datos registrados puede variar considerablemente, especialmente donde se encuentran suelos con resistividades no uniformes. La complejidad adicional causada por los suelos no uniformes es común, y sólo en algunos casos se obtiene un suelo de resistividad constante al aumentar la profundidad.



Entre los diferentes métodos de medición de la resistividad del suelo, las normas ANSI-IEEE Std 81, (1983) e IRAM 2281-2, (2002), mencionan y sugieren los métodos que se describen a continuación:

1.3.3.1. Método de los Dos Puntos.

Mediciones no muy exactas de la resistividad de los suelos inalterados (naturales), sin ser perturbados, se pueden efectuar directamente en el campo, por medio de un aparato llamado "SHEPARD SOIL RESISTIVITY METER" y otros métodos de dos puntos similares.

Este método consiste en dos electrodos (generalmente de hierro), uno de ellos más pequeño que el otro, ambos conectados a una barra aislada del aparato, o bien se conecta el borne positivo de una batería a través de un miliamperímetro al electrodo más pequeño, y el borne negativo al otro electrodo, tal como se indica en la siguiente figura 1.7:

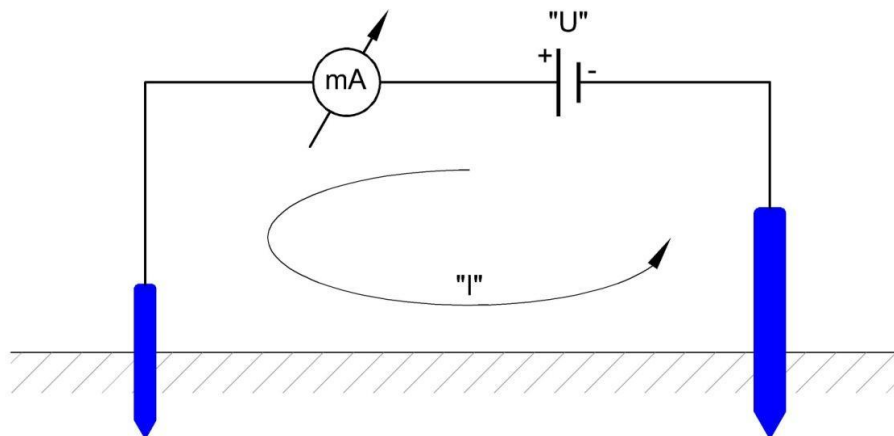


Figura 1.7: Esquema de medición del Método de los Dos Puntos

El instrumento, (o en su defecto el miliamperímetro), puede ser calibrado para leer directamente la resistividad en $[\Omega \cdot m]$, con relación a la tensión nominal de la batería.

$$\rho = \frac{U}{I} \quad [\Omega \cdot m]$$

Este tipo de aparato es fácil de ser transportado, y con él se pueden efectuar numerosas mediciones en un corto periodo de tiempo, en volúmenes reducidos, por ejemplo, en orificios efectuados en el suelo, en paredes ó en el fondo de las excavaciones.



1.3.3.2. Método de los Cuatro Puntos.

La aplicación de este método se verá reflejada en los futuros capítulos del presente Proyecto Integrador, debido a motivos que se comentan en párrafos posteriores, por lo tanto se pretende hacer mayor énfasis en la interpretación y en la descripción del mismo.

El método más seguro en la práctica de la medición de la resistividad promedio de suelos alterados y de grandes volúmenes de suelos inalterados (naturales), sin ser perturbados, es el método de los cuatro puntos.

Este método se basa en una prospección geoelectrica del suelo a partir de la introducción de una corriente en el terreno por un par de electrodos y la medición de la diferencia de potencial entre otro par de electrodos. La relación de estas dos magnitudes proporciona una resistividad aparente que depende de la resistividad de los materiales presentes en el suelo. Destaca el bajo precio de los equipos empleados y su fácil implementación, si bien requiere de un procedimiento laborioso (desplazamiento de los electrodos y cables), es relativamente rápido, fácil de usar, y normalmente proporciona resultados satisfactorios.

Dicha aplicación del método resistivo para la prospección geoelectrica, sufrió con el tiempo un gran proceso de evolución, tanto en la instrumentación como en los métodos de interpretación, lo que avala aún más la aplicación de esta técnica. Ver antecedentes en Gasulla, (1999).

El método proporciona diferentes configuraciones de los dispositivos tetraelectródicos lineales que básicamente depende del factor geométrico definido según la posición y el espaciamiento de los electrodos, (*Wenner Alpha*, *Wenner – Schlumberger*, *polo-dipolo*, *polo-polo*, *doble dipolo*, etc.). Entre los diferentes dispositivos tetraelectródicos lineales, se hace foco sobre el método de “Wenner Alpha”, dado que es el más utilizado, de simple ejecución, sencillo, práctico y fácil de comprender, tal como se describe a continuación:

Método de Wenner Alpha:

Consiste en instalar sobre el suelo cuatro pequeños electrodos, todos a la profundidad “b” y espaciados entre sí, a una distancia “a”, en línea recta. Los cuatro electrodos se ubican simétricamente con respecto a un mismo punto o centro de referencia “O” al que corresponderán todos los valores de resistividad medidos tal como se muestra en la siguiente figura 1.8:

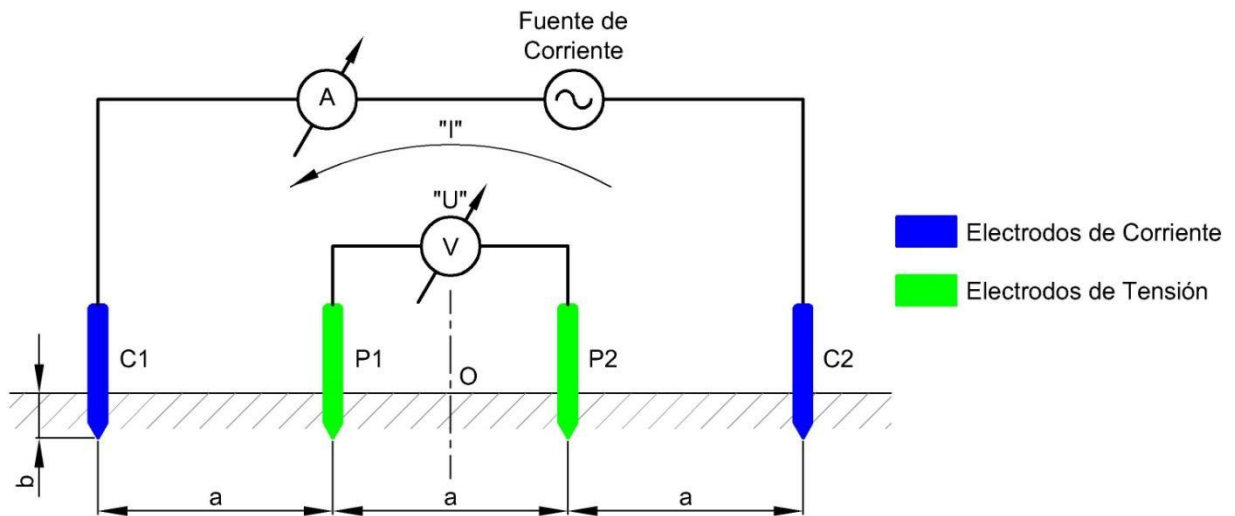


Figura 1.8: Esquema de medición del Método de los Cuatro Puntos (Wenner – Alpha)

Luego se hace circular una corriente alterna de medición “I”, a través de los dos electrodos exteriores C1 y C2 y se mide la tensión “U” entre los dos electrodos interiores P1 y P2, con un voltímetro de alta impedancia; o bien con un telurímetro de cuatro bornes.

Entonces la relación U/I da la resistencia R , en ohm $[\Omega]$, que reemplazada en la ecuación siguiente:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot U}{I} [\Omega \cdot m]$$

Se obtiene aproximadamente, la resistividad promedio del suelo, a una profundidad igual a la distancia “a” en [m].

El término “ $2 \cdot \pi \cdot a$ ” se denomina factor geométrico, que como se observa depende de la configuración de la posición y el espaciamiento lineal de los electrodos.

Consideraciones Generales:

La norma IRAM 2281-2, (2002), recomienda las siguientes condiciones generales:

- La profundidad teórica de hincado “b”, debe ser:

$$b \leq 0,1 \cdot a$$

O preferentemente:

$$b \leq 0,05 \cdot a$$



- En la práctica debe asegurarse un buen contacto eléctrico entre los electrodos de medición y el suelo, de tal manera que se cumplan las condiciones de utilización práctica de los instrumentos de medición.
- Un conjunto de lecturas tomadas con diferentes distancias “a”, conservando el mismo centro de referencia “O”, permite construir un diagrama de resistividades en función de la profundidad. Este diagrama, correctamente interpretado, indica si existen distintas capas de suelo, sus respectivas resistividades y la profundidad de la capa superior.
- Es conveniente tomar las mediciones en dos direcciones perpendiculares para las mismas distancias “a” alrededor del centro de referencia “O”.
- La resistividad de las muestras de los suelos, se puede medir mediante el método de los cuatro puntos colocando la muestra en una caja prismática pequeña, de sección transversal cuadrada, disponiendo de cuatro electrodos igualmente distanciados en línea recta. El largo de la caja debe ser función de la distancia central “a”.

Interpretación de las Mediciones de la Resistividad del Suelo:

A condición de que el suelo sea homogéneo, la configuración de las sondas no influye en la resistividad medida. En el caso de un suelo no homogéneo, la corriente “I” no se difundirá uniformemente, sino que fluirá preferentemente por los caminos o las capas de baja resistividad, y por consiguiente, el potencial no corresponderá ya a la fórmula del método. La resistividad medida dependerá entonces de la configuración de las sondas, y se designará normalmente por el término de resistividad aparente “ ρ_a ”.

Aunque la corriente de la medición penetra en teoría a una profundidad infinita, puede admitirse en la práctica que la profundidad efectiva de penetración de la corriente es igual al tercio de la distancia entre sondas de alimentación o, dicho de otro modo, que la resistividad aparente medida depende sólo de la resistividad y del espesor de las diversas capas del suelo por encima de una profundidad correspondiente a un tercio de la distancia entre sondas de alimentación.

Tomando como base los valores de la resistividad aparente del suelo, medidos por el método de los cuatro electrodos, debe establecerse un diagrama, donde las abscisas representan la distancia “a” y las ordenadas la resistividad aparente “ ρ_a ”. Es necesario poseer ciertos conocimientos para poder interpretar estas curvas, dada la diversidad de sus formas.

1.4. Resistencia de Puesta a Tierra (RPaT).



1.4.1. Concepto y Definición de Resistencia de Puesta a Tierra.

El concepto de resistencia de puesta a tierra (RPaT), o resistencia de dispersión a tierra, está asociado a la composición de las diferentes resistencias que se originan a través de las distintas partes de un SPT, y que se describen a continuación:

A. Resistencia del Conductor, del Electrodo y su Conexión:

La resistencia del conductor, del electrodo y su conexión de puesta a tierra es generalmente muy baja, dado que la conductividad de los materiales constitutivos de los elementos es muy elevada. Con corrientes muy intensas, como las que producen los rayos, la intensidad del campo en la superficie de los electrodos es tan grande que los materiales magnéticos de los electrodos de puesta a tierra se saturan y su permeabilidad relativa alcanza un valor igual a 1. Entonces puede desprejarse la resistencia longitudinal de los electrodos de tierra de dimensiones normales, comparada con la resistencia del volumen del suelo que rodea al electrodo.

B. Resistencia de Contacto entre la Superficie del Electrodo y el Suelo:

La resistencia de contacto, entre la superficie del electrodo y el suelo circundante puede aumentar la resistencia efectiva de la puesta a tierra en una proporción considerable. Esta resistencia de contacto puede reducirse por los arcos eléctricos que se producen en caso de descargas, y puede también derivarse por la admitancia capacitiva entre el conductor y el suelo. Así mismo, esta resistencia no suele tenerse en cuenta en los cálculos o proyectos porque es de muy difícil evaluación, pero es necesario considerarla dado que puede convertirse, en la práctica, en un término preponderante. No obstante, esta resistencia es casi insignificante siempre y cuando, que el electrodo de puesta a tierra esté libre de pintura, grasa, etc. y que se encuentre en firme contacto con la tierra.

C. Resistencia del Volumen del Suelo que Rodea al Electrodo:

La resistencia del volumen de suelo que rodea al electrodo es, sin duda, el factor más importante. Este volumen varía según la forma y el tamaño del electrodo, como así también de la naturaleza del suelo y del volumen de difusión de la corriente en este suelo.

Un SPT que permita la difusión de la corriente en un gran volumen de suelo, tendrá una resistencia menor que otro SPT que difunda la misma corriente en un volumen de suelo menor. El electrodo de puesta a tierra es rodeado por el suelo que está compuesto de cáscaras concéntricas equipotenciales según la forma del electrodo, (semiesferas equipotenciales), y todas del mismo grosor. Aquellas cáscaras más cercanas al electrodo, tienen un área más reducida, que produce un mayor grado de resistencia. Cada cáscara subsecuente incorpora un área mayor que causa una resistencia inferior. Esto finalmente



alcanza a un punto, donde las cáscaras adicionales ofrecen poca resistencia al suelo que rodea el electrodo de puesta a tierra.

Aspectos prácticos:

Cuando sea posible las jabalinas se hincarán directamente, esto hace que la resistencia de contacto tierra-electrodo sea la mínima desde el momento mismo de la instalación.

La resistencia eléctrica total de una instalación de puesta a tierra es la suma de las tres resistencias descritas anteriormente en los ítems A, B y C.

A condición de que la toma de tierra se utilice para la tierra de servicio o para la tierra de protección, puede despreciarse la resistencia del ítem "A", pero ésta puede constituir un factor esencial en caso de fenómeno de descarga rápida o cuando el sistema de electrodos está considerablemente alejado por razones estructurales, naturales u otras.

Puede también despreciarse la resistencia correspondiente a "B" si el sistema de electrodos está en contacto suficientemente íntimo con el suelo circundante. De no ser así, la contribución de la resistencia de contacto al valor total de la resistencia de puesta a tierra, puede elevarse notablemente (10 % o mucho más del valor esperado). Sin embargo, hay que tener en cuenta que puede reducirse por la formación de arcos eléctricos en casos de sobretensión de valor suficiente.

La resistencia "C" depende de la extensión lineal del sistema de electrodos y, en menor grado, de su forma y superficie.

Como la densidad de la corriente disminuye en función de la distancia al sistema de electrodos, la mayor parte de la resistencia se encuentra localizada en el suelo más próximo al sistema. Por ello, en el caso de un suelo estratificado, los electrodos deben instalarse en las capas que ofrezcan menor resistividad.

1.4.2. Métodos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra.

Las normas ANSI-IEEE Std. 81, (1983) e IRAM 2281-2, (2002), hacen referencia a distintas técnicas de medición de la resistencia de puesta a tierra, que se describen a continuación:

1.4.2.1. Método de Caída de Potencial.



La aplicación de este método se verá reflejada en los futuros capítulos del presente Proyecto Integrador, debido a los motivos que se comentan en párrafos posteriores, por lo tanto se pretende hacer mayor énfasis en la interpretación y en la descripción del mismo.

Este método consiste en hacer circular una corriente alterna por el electrodo en estudio de la puesta a tierra a medir y un electrodo auxiliar de corriente. A continuación, se toma nota de la influencia de esta corriente en términos de tensión (ó diferencia de potencial), entre el suelo y un electrodo de prueba de potencial, tal como se observa en la figura 1.11:

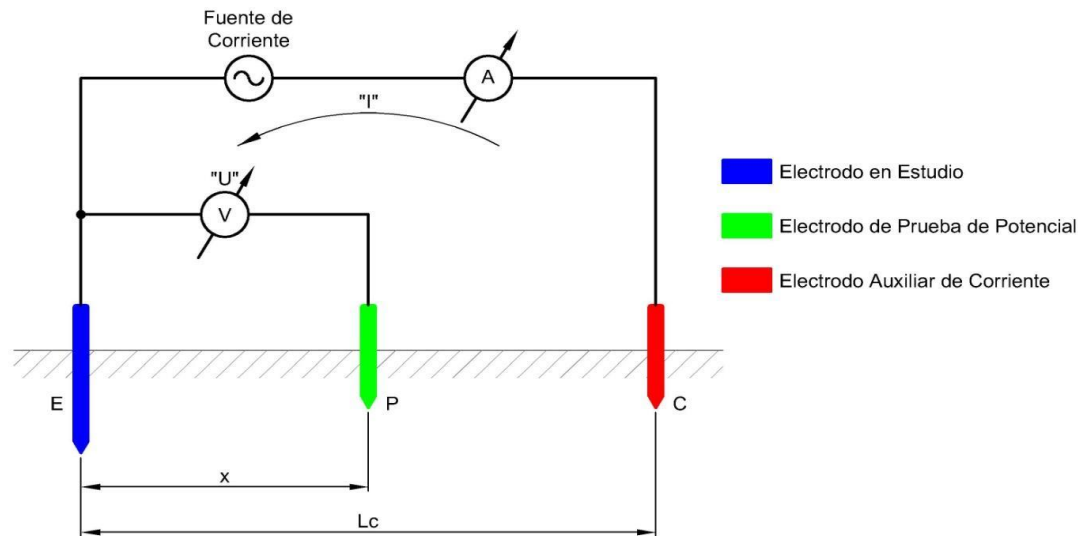


Figura 1.11: Esquema de medición del Método de Caída de Potencial

Claramente se puede visualizar dos circuitos eléctricos, que se encuentran conformados tal como se describe a continuación:

- **Circuito de Corriente:** comprendido por una fuente de corriente alterna, que se conecta por un lado al electrodo en estudio (electrodo "E"), de la puesta a tierra a medir, y por el otro lado a un electrodo auxiliar denominado de corriente (electrodo "C"), ambos separados entre sí a una distancia " L_c ", lo suficientemente alejados como para que no influyan sus resistencias mutuas.
- **Circuito de Tensión:** comprendido por un voltímetro, que se conecta entre el electrodo en estudio (electrodo "E"), de la puesta a tierra a medir, y un electrodo de prueba denominado de potencial (electrodo "P"), cuya distancia de separación entre ambos es " x ", variable en forma escalonada, con el objeto de poder registrar distintos valores de tensión (ó diferencia de potencial), a medida que se va alejando el electrodo de prueba desde el punto donde se instala el electrodo a estudiar hasta el punto donde se encuentra el electrodo auxiliar.



En definitiva, el método de caída de potencial, consiste básicamente en hacer circular una corriente "I", de valor conocido, entre los electrodos "E" y "C", que se encuentran separados e instalados a una distancia "Lc" lo suficientemente alejados entre sí, y a continuación registrar sucesivas mediciones de la diferencia de potencial que existe entre los electrodos "E" y "P", a medida que aumenta la distancia de separación "x", desde el punto donde se encuentra emplazado el electrodo "E" hasta el electrodo "C", con el objeto de poder establecer el trazado de una curva de potencial de la relación $U/I = R$, en función de la distancia de espaciamento "x".

Los potenciales se miden con respecto al electrodo en estudio "E", donde se supone que hay un potencial teóricamente nulo, y en dirección al electrodo "C".

El perfil de la curva de potencial, posee una forma similar a la que se representa en la siguiente figura 1.12:

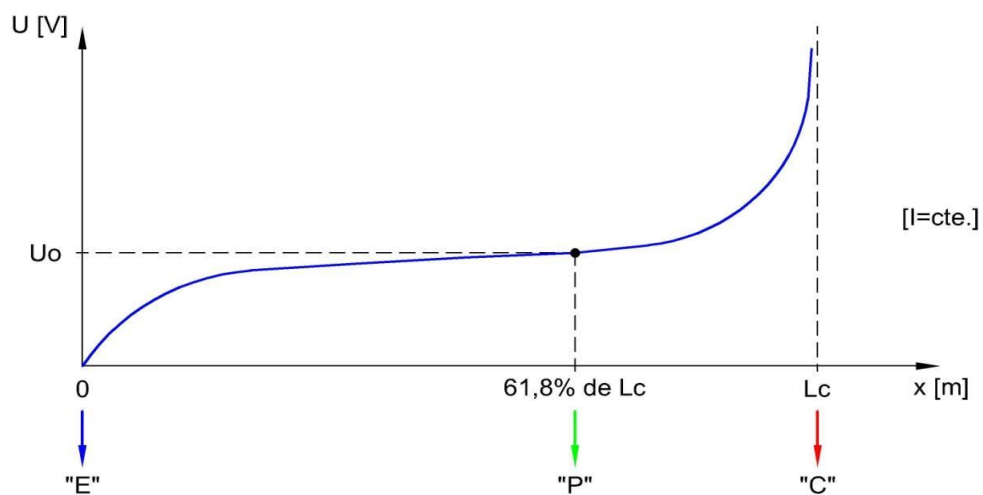


Figura 1.12: Curva de Potencial del Método de Caída de Potencial

La resistencia de puesta a tierra del electrodo en estudio es la relación entre "U" e "I", siendo "Uo" la diferencia de potencial correspondiente a la parte de la curva donde tiende a nivelarse, que generalmente sucede cuando "x" es aproximadamente el 61,8% de "Lc" y es el valor que se toma para determinar dicha resistencia de puesta a tierra que se está midiendo. Esto se demostró por primera vez por Curdts, (1958), para pequeños electrodos hemisféricos.

El electrodo auxiliar de corriente "C" debe estar fuera de la influencia de la puesta a tierra a medir. Teóricamente la influencia se extiende al infinito pero, en la práctica, existe un límite porque ella varía inversamente con la distancia respecto de la puesta a tierra a medir, según una ley exponencial.



En la figura 1.13, se puede apreciar que la curva de trazos, muestra el efecto de una distancia Lc' demasiado pequeña entre "E" y "C" que generalmente da lugar a mediciones erróneas, en comparación con la curva descrita anteriormente. Cuando se da el caso de que la tangente en el punto de inflexión es casi horizontal ($\alpha \approx 0^\circ$), el error al emplear la relación U_0/I será despreciable y la medición válida.

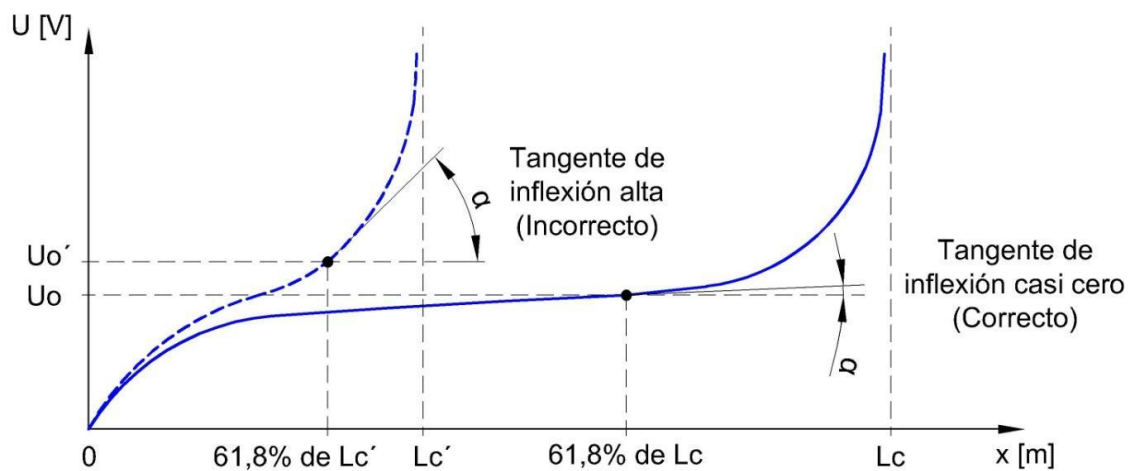


Figura 1.13: Curva de Potencial con distancia Lc' demasiado pequeña

Es importante tener en cuenta que el análisis teórico de la caída de potencial, muestra que la colocación del electrodo de potencial "P" en dirección opuesta al electrodo "C", con respecto al electrodo en estudio "E" ("P2"), tal como se observa en la figura 1.14, resultará siempre una resistencia aparente medida más pequeña que la verdadera resistencia, a pesar de que presenta la ventaja de minimizar el problema de acoplamiento entre los conductores de prueba.

Por otra parte, cuando "P" está situado en el mismo lado que el electrodo "C", pero lejos de él ("P1"), hay un lugar en particular que da el valor de resistencia verdadera, pero es muy complejo determinar a qué distancia se encuentra dicho valor de resistencia.

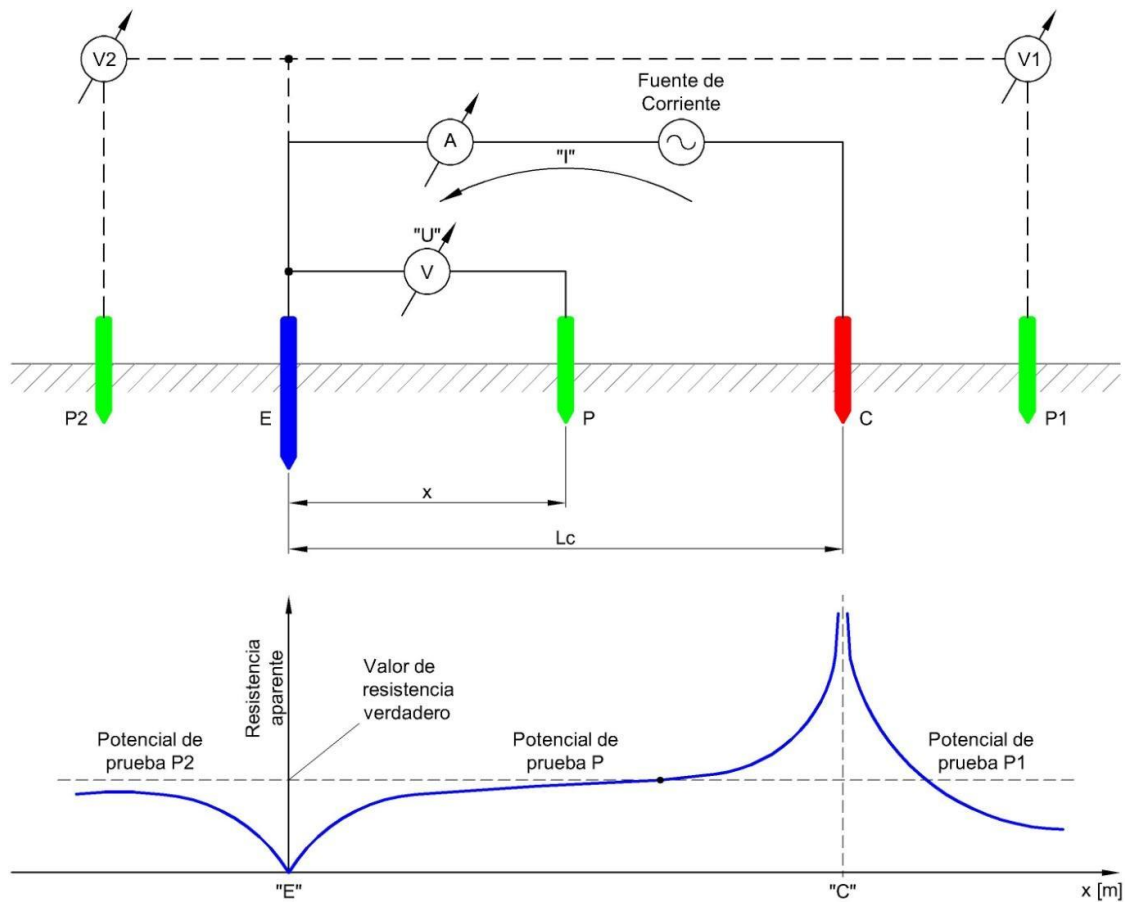


Figura 1.14: Curvas de Potencial a distintas distancias de espaciamiento "x"

Este método tiene varias aplicaciones y es adecuado para todas las mediciones de resistencias de puesta a tierra.

Se introduce el término "impedancia" para poner de relieve que la caída de tensión se mide con una corriente suministrada por una fuente de corriente alterna. Por lo tanto existe cierta componente reactiva debida a la inductancia del electrodo dispersor a medir y la de retorno de corriente por el suelo. Si bien su influencia comienza a hacerse notable para $R \leq 0,5\Omega$, puede resultar crítica para valores de $R \leq 0,2\Omega$, en cuyo caso puede ser necesaria la medición en dos frecuencias para discriminar las componentes activas y reactivas.

Así mismo, la resistencia de una malla de puesta a tierra extensa puede tener una componente reactiva apreciable cuando la resistencia es menor que $0,5\Omega$. Por lo tanto el valor medido con voltímetro y amperímetro es de "impedancia" y de este modo se debe considerar, no obstante que la terminología generalmente es de "resistencia de dispersión a tierra" porque los instrumentos de medición directa (telurímetros) miden resistencias puras.



Factores que influyen en la exactitud de las mediciones:

Según la norma IRAM 2281-1, (1996), expresa los siguientes factores:

Hay que tener en cuenta la presencia en el suelo de corriente vagabundas de origen telúrico o industrial. Dado que la tensión a medir es generalmente pequeña, las tensiones debidas a estas corrientes son perturbadoras.

Los aparatos comerciales de medición de la resistividad del suelo y de la resistencia de dispersión incluyen normalmente un dispositivo que permite reducir al mínimo el efecto de las corrientes electrolíticas y vagabundas. El procedimiento habitualmente utilizado consiste en colocar un rectificador en el circuito de potencial, que funcione en sincronismo con la corriente de medición, a fin de rechazar las corrientes que no tengan la misma frecuencia ni la misma fase.

Es conveniente variar la frecuencia de la corriente de medición, modificando, por ejemplo, la velocidad de rotación de la manivela si se utiliza un generador manual como fuente de corriente. Para disminuir el acoplamiento inductivo entre conductores de alimentación y conductores de medición de tensión, se recomienda alejarlos al máximo unos de otros y elegir de forma apropiada la frecuencia que se ha de utilizar.

Hay que tener también en cuenta la posibilidad de los efectos peliculares en el suelo. Cuando la corriente es alterna, esta genera campos magnéticos alternos que, a su vez, inducen f.e.m.² sobre el suelo. Esto hace que la corriente ya no se reparta de forma uniforme por toda la sección sino que se tienda a concentrar en la parte externa y penetre menos profundamente en el suelo. Este es el efecto pelicular, también llamado efecto piel, efecto Kelvin o efecto Skin, efecto que es tanto más acusado cuando más elevada es la frecuencia de la corriente y débil la resistividad del terreno.

Por eso, en la práctica habrá que buscar frecuencias para las que este efecto sea despreciable como la de 85 Hz, que proporciona una penetración de 550m en terrenos de 100Ω.m. (García Márquez, (1999)).

En particular, si la resistividad del suelo es pequeña, las mediciones efectuadas, cuando las sondas de alimentación están muy alejadas entre sí, pierden exactitud debido al efecto pelicular en el suelo.

Si las mediciones se hacen aplicando una corriente continua de inversión periódica, y si las inversiones se hacen a un ritmo rápido, puede inducirse en el circuito de medición de tensión, una tensión parásita debida a las inversiones de la corriente; esta tensión puede ser particularmente importante si las sondas están alejadas unas de otras, puesto que la

² f.e.m.: fuerza electromotriz.



resistencia mutua entre el circuito de medición de tensión y el circuito de alimentación de corriente disminuye en función de la distancia entre sondas, en tanto que aumenta el acoplamiento inductivo. Cuando la resistividad del suelo es pequeña el efecto inductivo se aprecia también más que cuando ella es grande, ya que la resistencia mutua es proporcional, mientras que el acoplamiento inductivo depende en menor grado de la resistividad.

La conducción en el suelo es esencialmente un fenómeno electrolítico; por lo tanto, el paso de la corriente continua de medición al suelo provoca la aparición de una fuerza contraelectromotriz, susceptible de motivar corrientes en el circuito de medición y de provocar errores de medición, si no se toman precauciones.

1.4.2.2. Otros Métodos de Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra.

Método de los Dos Puntos (Método de los Dos Polos).

Método de los Tres Puntos (Método de Triangulación).

Las normas ANSI-IEEE Std 81, (1983) e IRAM 2281-2, (2002), establecen diferentes métodos de medición de la resistencia de puesta a tierra (Método de Proporción; Pruebas de Fallo por Etapas, etc.). No obstante, debido a las limitaciones del presente Proyecto Integrador, solamente se describieron los métodos más eficaces y utilizados, en cuanto a la ejecución de las actividades de campo in situ y al alcance de este trabajo, dejando los restantes métodos de interés, pendientes para el lector.



1.5. Teorías de Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra.

Precediendo a los trabajos desarrollados en el presente Proyecto Integrador, se pretende comparar los resultados obtenidos en las mediciones efectuadas en los futuros capítulos, con respecto a distintas teorías que hacen a la cotidianeidad del cálculo de la resistencia de puesta a tierra. Con tal propósito, se presentan a continuación las siguientes expresiones:

1.5.1. Resistencia de Puesta a Tierra de Jabalinas.

- **Según norma IRAM 2281-1, (1996):**

Se transcribe a continuación el concepto de Pierre G. Laurent sobre la aproximación al valor verdadero o exactitud de las fórmulas en el cálculo de la puesta a tierra. Así mismo, la norma propone las siguientes hipótesis:

1. Hipótesis Cilindro-Esfera:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{D}\right) [\Omega]$$

Dónde:

R : es la resistencia de dispersión de la jabalina, expresada en $[\Omega]$;

ρ : es la resistividad del medio (suelo), expresada en $[\Omega \cdot m]$;

L : es la longitud de la jabalina, expresada en $[m]$;

D : es el diámetro de la jabalina, expresado en $[m]$.

2. Hipótesis Elipsoidal: recomendado en publicaciones de la Cátedra de Instalaciones Electromecánica de la FCEFyN³ de la UNC⁴, y utilizada para los cálculos exigidos por la EPEC⁵.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{D}\right)$$

Donde R , ρ , L y D son los parámetros definidos anteriormente.

³ FCEFyN: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

⁴ UNC: Universidad Nacional de Córdoba.

⁵ EPEC: Empresa Provincial de Energía de Córdoba.



3. Hipótesis de Corriente Uniforme a lo Largo de la Jabalina:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Ln}\left(\frac{8L}{D} - 1\right)$$

Donde R, ρ , L y D son los parámetros definidos anteriormente.

• **Según la AEA 90364-7-771, (2006):**

Para Jabalinas enterradas verticalmente.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\text{Ln} \frac{8L}{D} - 1\right)$$

Donde R, ρ , L y D son los parámetros definidos anteriormente.

• **Según el Ing. Juan Carlos Arcioni, (2002):**

Para un dispersor lineal, Jabalina vertical.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Ln}\left(\frac{2L}{D} + 1\right)$$

Donde R, ρ , L y D son los parámetros definidos anteriormente.

1.5.2. Resistencia de Puesta a Tierra de un conjunto de Jabalinas.

Como dijimos anteriormente cuando se instala un conjunto de jabalinas hay que tener en cuenta una disminución de la resistencia de puesta a tierra, debido a la influencia de las superficies equipotenciales de cada una y por el conductor de conexión entre ellas. Así mismo, la norma IRAM 2181-1, (1996), presenta la siguiente expresión:

$$R_T = \frac{R_j}{N_j} \times f$$

Dónde:

R_T : es la resistencia del conjunto de jabalinas, expresada en $[\Omega]$;

R_j : es la resistencia de una jabalina, expresada en $[\Omega]$;

N_j : es el número de jabalinas conectadas en paralelo;

f : es el factor de incremento, obtenido de un diagrama de la norma IRAM 2181-1, (1996), similar a la de *figura N°1.4* del presente Proyecto Integrador, según N_j en función de la relación L/D, donde L y D son los parámetros definidos anteriormente.



El valor calculado o teórico de la resistencia de puesta a tierra, puede variar considerablemente con respecto al valor que se mide debido a los siguientes factores:

- a) Condiciones del suelo en el momento en que se efectúa la medición, (humedad, compactación, salinidad, etc.);
- b) Valor de la resistividad adoptada para el cálculo, según la amplitud del estudio realizado, (por ejemplo: número y dispersión de ensayos, distancia entre sondas, etc.);
- c) Superficie, configuración y estado (físico y químico) de los electrodos enterrados;
- d) Efecto de los conductores enterrados en las proximidades, etc.

1.5.3. Resistencia de Puesta a Tierra de Electrodo Tipo según MIE RAT 13

La normativa española MIE RAT 13 sobre instalaciones de puesta a tierra, define un método de cálculo y proyecto para este tipo de instalaciones para centros de transformación de tercera categoría (las de tensión nominal igual o inferior a 30 [kV], y superior a 1 [kV]).

Dicha norma expone un método de cálculo para proyectar instalaciones de puesta a tierra, basadas en electrodos de configuraciones geométricas tipo, para centros de transformación (CT) de tercera categoría.

Las configuraciones de electrodos tipo consideradas por la MIE RAT 13 son:

- Cuadrados o rectángulos sin jabalinas.
- Cuadrados o rectángulos con 4 y 8 jabalinas.
- Electrodo longitudinal con 2, 3, 4, 6 u 8 jabalinas.

Para cada configuración, se han considerado además las profundidades de enterramiento de 0,5 y de 0,8 [m]. Para el caso de las jabalinas se han considerado longitudes de las mismas de 2, 4, 6 u 8 [m].

El **método de Howe** según lo indica la MIE RAT 13 se basa en la descomposición del electrodo en infinitas esferas diferenciales, que disipan una corriente “dl” para luego determinar el potencial en un punto integrando el aporte de las infinitas esferas diferenciales.

En definitiva, este método analiza el comportamiento de un electrodo que disipa una intensidad de corriente en un medio infinito y homogéneo, suponiendo que la corriente de disipación lineal es constante en todo el electrodo, e igual a la corriente total disipada dividida por la longitud total del conductor



Para facilitar el estudio de diversos tipos de electrodos y posibilitar la obtención de expresiones matemáticas sencillas, se dividirá el electrodo en conductores lineales paralelos a algunos de los ejes de un sistema de coordenadas ficticio

Para la determinación de la resistencia de puesta a tierra se divide el electrodo en “n” elementos según las consideraciones anteriores, calculándose el potencial del electrodo como media de los potenciales de todos sus elementos. Dividiéndose este por la intensidad total disipada, se obtendrá el valor de la resistencia de puesta a tierra.

Sin embargo debido a la complejidad que presenta la aplicación de este método para calcular la resistencia del electrodo estudiado en el presente proyecto integrador, se decide no utilizar el método de Howe, y solo se hace mención a él a fines de dar a conocer su existencia como alternativa para futuros proyectos.

1.6. Potenciales y Gradientes

Circulación de Corriente por el suelo:

El suelo es un material complejo de analizar y se caracteriza por ser un conductor eléctricamente pobre en comparación con los metales, pero dispone de un área lo suficientemente grande como para conducir una corriente, considerándolo como un medio de baja resistencia. Entonces podemos decir, que la corriente utilizará toda el área transversal disponible para propagarse, y por lo tanto su comportamiento no debe ser tratado como un modelo circuital, sino como una distribución de campo, en donde las líneas de corriente tendrán transversales a ellas, líneas equipotenciales (o superficies equipotenciales), que disminuirán su valor a medida que se alejan de la fuente.

Así mismo, la resistividad del suelo varía debido a diversos factores mencionados en párrafos anteriores, por lo tanto el terreno medio de tres dimensiones no es isótropo, es decir que la resistividad varía tanto vertical como horizontalmente. En consecuencia, se dificulta realizar un cálculo preciso de la distribución de la corriente y por lo tanto se debe recurrir a hipótesis sencillas en donde la precisión estará sujeta a la incertidumbre de los parámetros de la cual dependa.

Distribución de Potencial de un Electrodo de Puesta a Tierra Semiesférico:

En base a lo descrito anteriormente, la teoría que desarrollaremos a continuación se basa en las siguientes hipótesis:



- 1- El suelo es homogéneo e isotrópico y su resistividad eléctrica es “ ρ ” en [$\Omega.m$] constante.
- 2- Las líneas de corriente que salen del electrodo se dispersan alrededor del mismo y se mantienen siempre perpendiculares a cada superficie equipotencial, que tienen una forma igual o parecida a la del electrodo en las cercanías y a mayores distancias forma de esfera o semiesfera.

Se analizará el caso de un electrodo dispersor semiesférico de radio igual a “ r ”, tal como se observa en la figura 1.15, a la cual se le hace circular una corriente “ I ”:

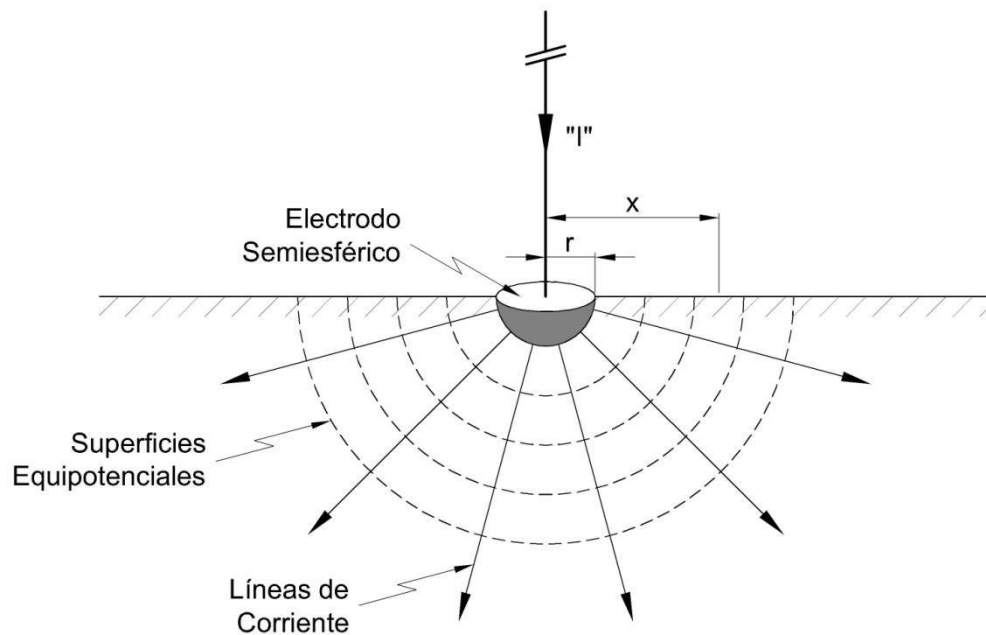


Figura 1.15: Gradiente de Potencial de Electrodo Semiesférico

La densidad de corriente a una distancia $x \geq r$ es:

$$\delta(x) = \frac{I}{S(x)} = \frac{I}{2\pi x^2}$$

El campo eléctrico $E(x)$, producido por la corriente I , estará dada por:

$$E(x) = \rho \cdot \delta(x) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi x^2}$$

Así mismo, la diferencia de potencial entre el electrodo de radio “ r ” y el punto considerado de distancia “ x ”, será:



$$U_{r-x} = V_r - V_x = V(r) - V(x) = \int_r^x E(x) \cdot dx = \int_r^x \frac{\rho \cdot I}{2\pi x^2} \cdot dx$$

$$U_{r-x} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right] = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r} \cdot \left[1 - \frac{r}{x} \right]$$

El potencial absoluto del electrodo U_{r-x} con respecto al SEN, (suelo eléctricamente neutro), es decir con respecto a un punto infinitamente alejado, se obtiene con la fórmula:

$$U_r = \lim_{x \rightarrow \infty} (U_{r-x}) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r}$$

Finalmente, haciendo extensiva la expresión anterior, el potencial absoluto (tensión absoluta), con respecto a un punto cualquiera "x" del entorno de la puesta a tierra, que diste desde el centro del electrodo, será:

$$U_x = \frac{\rho \cdot I}{2\pi x}$$

En esta última expresión se puede observar que para una corriente de falla y un electrodo determinado, el potencial absoluto varía inversamente proporcional a la distancia desde el centro del electrodo, independientemente del radio del mismo. No obstante, se puede representar a esta relación mediante una curva similar a la que se muestra en la siguiente figura 1.16:

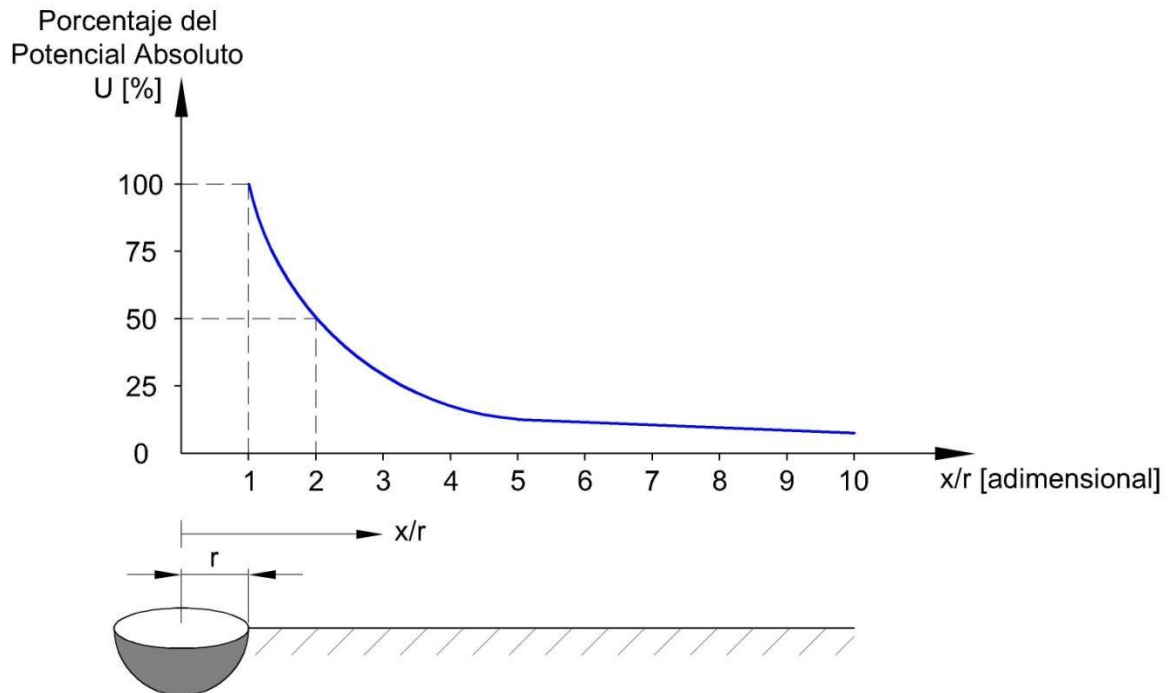


Figura 1.16: Curva de Potencial de un Electrodo Semiesférico

Tal como se observa, la curva de potencial posee una forma hiperbólica, que cae abruptamente a partir de una distancia igual al radio y a medida que incrementa la trayectoria de los puntos, la variación de potencial se reduce asintóticamente tendiendo a cero para una distancia infinita. De hecho, para los puntos que se encuentran a una distancia igual a dos veces el radio a partir desde el centro del electrodo, el potencial disminuye a la mitad.

Siguiendo el mismo procedimiento, se puede obtener la expresión del potencial y su curva representativa para distintas configuraciones de SPT, tales como por ejemplo aquellos que están constituidos por mallas o jabalinas donde la distribución de potencial adquiere configuraciones irregulares que en la mayoría de los casos son imposibles de analizar desde el punto de vista teórico, y por lo tanto debe satisfacerse con expresiones empíricas que brindan valores característicos de dichos sistemas, pero de todas formas siempre las curvas de variación del potencial presentan la misma tendencia asintótica a cero para distancias mayores que las dimensiones del sistema.

En definitiva, concebir, diseñar, construir y operar un SPT es sumamente necesario, de manera tal que ante la circulación de una corriente de falla que produce una diferencia de potencial entre la instalación de puesta a tierra y el terreno ó entre dos puntos del mismo, proporcione seguridad a los seres humanos, protección a las instalaciones e incluso que no generen daños a otros sistemas con los que pueden interactuar.



Teniendo en cuenta lo descripto anteriormente, se puede expresar las siguientes definiciones de interés, según la norma IRAM 2281-1, (1996):

Gradiente de Potencial en un Punto: Diferencia de potencial por unidad de longitud medida en dirección en que es máxima.

Tierra de referencia: Zona del terreno, en particular de su superficie (suelo), tan alejada del electrodo de tierra que no existen diferencias de potencial medibles o apreciables entre distintos puntos en esta zona (suelo eléctricamente neutro).

Tensión de puesta a tierra: Aquella que se produce entre una instalación de puesta a tierra y la tierra de referencia.

Tensión de contacto: Diferencia de potencial (parte de la tensión de puesta a tierra) a la que puede quedar sometido el cuerpo humano entre la mano y el pie o entre una mano y la otra (distancia horizontal de aproximadamente 1 m entre partes afectadas).

Tensión de paso: Diferencia de potencial (parte de la tensión de puesta a tierra) que aparece entre dos puntos separados por una distancia igual al paso normal humano (aproximadamente 1 m) sobre la superficie de apoyo de los pies (tierra, césped, suelo, vereda, pavimento, etc.).

1.7. Seguridad para Personas y Animales en SPTs.

Debido a la accesibilidad de los seres humanos y animales en las inmediaciones de las subestaciones transformadoras, es necesario dimensionar un sistema de puesta a tierra que no represente un riesgo a la vida de los mismos.

Como se definió en el punto anterior, existe un gradiente de potencial en el suelo donde está inmerso un sistema de puesta a tierra, lo que da lugar a generar una diferencia de potencial entre distintos puntos de la instalación y del suelo propiamente dicho. Estas generan las llamadas tensiones de paso y de contacto que se definieron también el punto anterior.

Teniendo en cuenta estas tensiones principalmente, y basándonos en los valores de resistencia del cuerpo humano se dimensionan los SPT para protección de personas.

1.7.1. Límites Admisibles de Tensión para el Cuerpo Humano.



La normativa IEC 60479-1, establece los límites admisibles en base a las curvas límite de corriente circulante por el cuerpo humano. Dicha curva se puede ver en la figura 1.17.

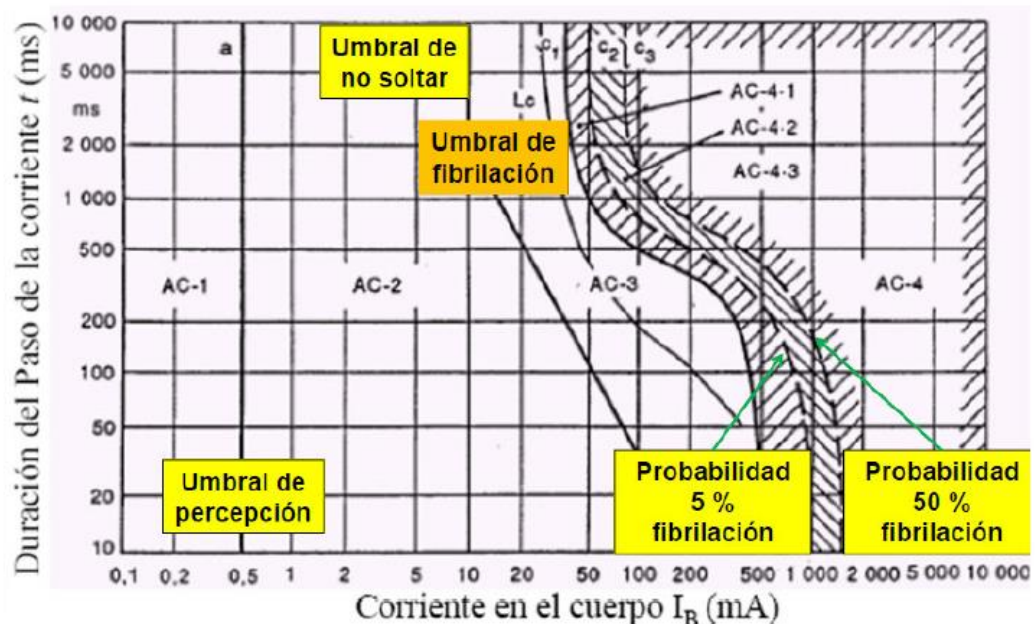


Figura 1.17: Curvas de valores límites admisibles según valor de corriente y duración (AEA: Tratamiento de neutro y puesta a tierra”, módulo 6, (2012)).

La normativa argentina AEA en su “tratamiento de neutro y puesta a tierra”, modulo 6, (2012) explica que si bien los efectos fisiológicos se relacionan con la corriente que circula, es necesario traducir estas curvas a tensiones admisibles, como es práctica general para poder comparar con las tensiones de paso y contacto obtenidas por cálculo o medición. Para esto es necesario considerar la resistencia del cuerpo humano y las impedancias presentes en el camino de retorno de corrientes. Al respecto la reglamentación define una curva básica de tensión de contacto admisible-tiempo, la que puede corregirse con otras resistencias según las condiciones constructivas.

Para el dimensionamiento se deberán tener en cuenta según el cuaderno técnico de AEA anteriormente citado, las siguientes consideraciones que tienen que ver con las condiciones fisiológicas propias del ser humano.

- Curva tensión de contacto versus tiempo admitida sin resistencias adicionales.
- Resistencias entre puntos de contacto del cuerpo humano y caminos de retorno.



- Magnitud de corriente de defecto a tierra (IE) y la correspondiente elevación del potencial.
- Duración de la falla.

La figura 1.17 procedente de la IEC permite visualizar zonas en el plano tiempo-corriente en los que se producen efectos de distinto nivel de criticidad. Estas curvas están establecidas para trayectoria de la corriente de mano izquierda a pies, adoptada como la situación más probable de las críticas.

Dado que los efectos de la corriente (sobre todo el más severo: la fibrilación ventricular) dependen de la trayectoria que esta adopte, la IEC 60479-1 define factores a aplicar sobre la corriente circulante para luego aplicar las curvas antedichas, tomando como base (factor 1) la trayectoria anterior. Dichos factores se ven en la siguiente tabla 1.1

Trayectoria de la corriente	Factor
Mano izquierda, un pie o ambos	1
Mano izquierda-mano derecha	0,4
Espalda a mano izquierda	0,7
Pecho a mano izquierda	1,5
Pie derecho a pie izquierdo	0,04

Tabla 1.1. Factores de corrección para valores admisibles de corriente (AEA: Tratamiento de neutro y puesta a tierra”, módulo 6, (2012)).

1.7.2. Resistencia del Cuerpo Humano.

La IEC 60479-1, presenta investigaciones respecto a la resistencia del cuerpo humano al paso de la corriente presenta las siguientes características:

- Las extremidades son las partes que influyen en forma dominante en su valor. El torso prácticamente no contribuye a su valor. Puede considerarse que la resistencia para una trayectoria está determinada por las resistencias de las extremidades, en serie y/o paralelo según corresponda.



- Las extremidades superiores e inferiores presentan aproximadamente la misma resistencia.
- La resistencia del cuerpo humano depende de la tensión aplicada. Esto es por el efecto “aislante” de la piel, el que se deteriora con la tensión aplicada.
- La resistencia del contacto con la piel depende fuertemente de si ésta está seca, mojada o mojada con una solución salina. Esta última situación obedece por ejemplo a exposición con agua de mar, como también a la transpiración producida por la actividad física.

La siguiente tabla 1.2 proporciona valores de resistencia estadísticos para una trayectoria mano-mano o mano-pie, para distintas tensiones aplicadas y situaciones de la zona de contacto, con una probabilidad de no ser superados del 5% y del 50%.

Tensión V	Seco		Mojado		Salado	
	5%	50%	5%	50%	5%	50%
25	1750	3250	1175	2175	960	1300
50	1375	2500	1100	2000	940	1275
75	1125	2000	1025	1825	920	1250
100	990	1725	975	1675	880	1225
125	900	1550	900	1550	850	1200
150	850	1400	850	1400	830	1180
175	825	1325	825	1325	810	1155
200	800	1275	800	1275	790	1135
225	775	1225	775	1225	770	1115
400	700	950	700	950	700	950
500	625	850	625	850	625	850
700	575	775	575	775	575	775
1000	575	775	575	775	575	775

Tabla 1.2. Resistencias estadísticas para trayectoria mano-mano o mano-pie (AEA: Tratamiento de neutro y puesta a tierra”, módulo 6, (2012)).

La curva de la tensión de contacto admisible en función del tiempo de la Reglamentación se determinó mediante los criterios siguientes (indicados en la IEC 61936):

- Valores de impedancia del cuerpo humano en función de la tensión con una probabilidad de ser superados del 95%.
- Valores de corriente en función del tiempo con una probabilidad de fibrilación ventricular mucho menor del 5%.

Consideraciones adicionales:



- Dos pies en paralelo, dentro del calzado con piel mojada y salada, considerando que en el calzado se conservó la humedad de transpiración.
- Mano izquierda haciendo contacto con superficie mojada.

A esta resistencia se le agregó la adicional de calzado usado mojado.

En la tabla siguiente se observan los valores de tensión aplicada sobre el cuerpo humano de partida, las corrientes que resultan, el tiempo que el cuerpo las admite según curva C1, y la tensión de contacto presunta admitida que resulta al incluir en serie la resistencia de calzado.

Tensión en cuerpo humano	Resistencia mano mojada-pies mojados y transpirados (5%)	Corriente en cuerpo humano	Tiempo admisible (curva C1)	Tension contacto con calzado
V	Ohm	mA	s	V
25	828	30		
30	819	37	5,00	67
35	811	43	1,60	78
41	844	49	1,00	90
50	785	64	0,73	114
75	743	101	0,50	176
100	708	141	0,41	241
125	663	189	0,36	314
150	633	237	0,32	387
175	615	285	0,28	460
200	598	335	0,23	535
225	580	388	0,16	613
270	566	477	0,05	747
281	562	500	0,01	781
Resistencia calzado =		1000 Ohm		

Tabla 1.3. Valores de tensión aplicados sobre el cuerpo humano (AEA: Tratamiento de neutro y puesta a tierra”, módulo 6, (2012)).

1.7.3. Relación del Gradiente de Potencial con las Tensiones de Paso y Contacto.



Como se puede apreciar en la figura 1.18, si mantenemos constantes las resistencias puestas en juego y las distancias de paso y contacto constantes, entonces las tensiones de paso y contacto solo dependerán de la curva de caída de potencial en el suelo. Para una caída muy marcada existirán entonces valores de tensión tanto de paso como de contacto más elevados que si esta curva fuera más suave.

Si recordamos la ley de Ohm, la diferencia de potencial entre dos puntos en estudio será tanto más grande en función de la resistencia del terreno. A mayores resistencias la caída de potencial entre dos puntos será mayor. Es entonces este un factor determinante.

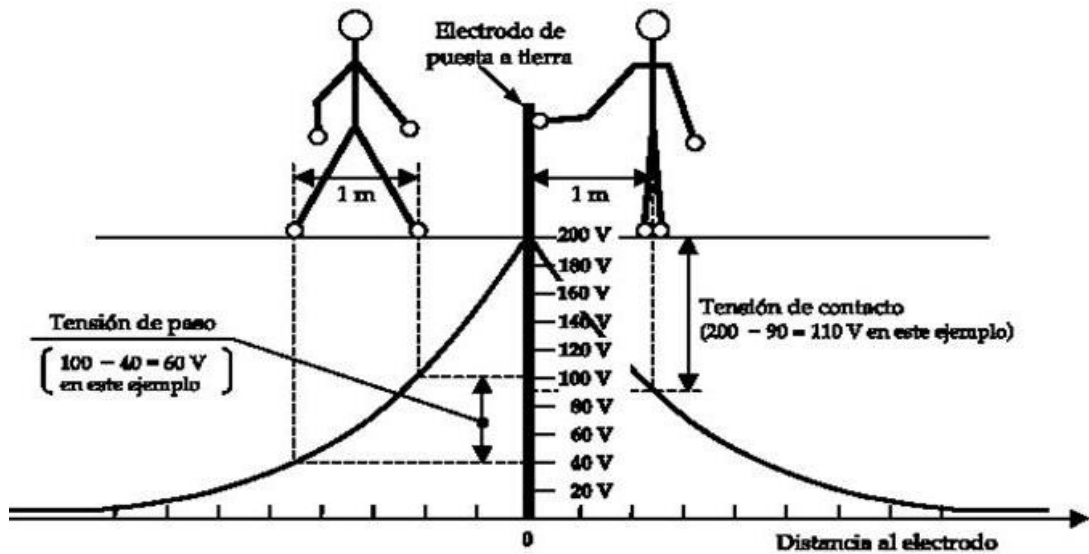


Figura 1.18: Esquema de tensiones de paso y contacto y de un gradiente de potencial.

a partir de la obtención de la curva de potencial se pueden obtener los valores de tensiones de paso y de contacto. Y a partir de la resistencia puesta en juego (mano-pie, mano-mano, húmedo, etc.) se puede conocer la corriente circulando por el cuerpo y determinar si dicho valor está dentro de los límites aceptables.



CAPITULO 2:





1. Parámetros de los Suelos.

El presente capítulo trata sobre todos los parámetros eléctricos de los suelos donde se instalan los SPT.

El suelo estudiado es del tipo loésico, característico de la zona central del país, y de la provincia de Córdoba en particular, como se observa en la figura 2.1.

Cabe además destacar que debido a que el suelo presenta heterogeneidades y anisotropías la caracterización de ellas no es sencilla.

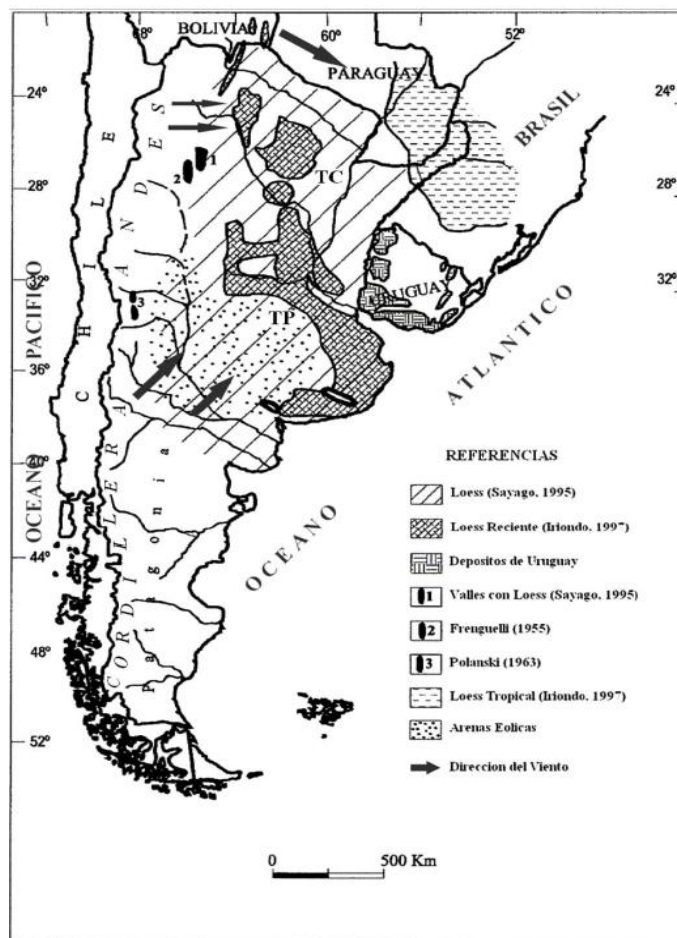


Figura 2.1. Distribución de suelos en Argentina.



2. Loess, Suelo Característico de Córdoba.

El tipo de loess que se encuentra en la zona de Argentina es de origen eólico (Teruggi 1957) y puede ser clasificado dentro de los suelos como plegable (Aitchinson 1973). Por lo tanto, se observa un cambio importante de volumen cuando el mismo ha sido humedecido o compactado o ambos efectos combinados.

En Argentina es muy común compactar el suelo para mejorar algunas propiedades como la resistencia al corte, la permeabilidad, y deformación. Es importante destacar esto último debido a que en el caso que nos compete, en las subestaciones transformadoras se lleva a cabo una compactación del suelo bajo de ellas, en el cual se instala el SPT.

En cualquier caso, el rendimiento final del suelo compactado depende de la calidad de compactación obtenida en obra. Por lo tanto, la vigilancia y el control durante el proceso de construcción son de gran importancia (Daniel 1990; Benson et al. 1994).

Los sedimentos loésicos son un conjunto de sedimentos del período cuaternario, formados por partículas mayoritariamente limosas. El comienzo de la sedimentación loessoide ha sido relacionada con una fase de la orogenia andina del Mioceno Tardío (cerca de 10 millones de años), que al modificar la cordillera de los Andes generó una barrera de los vientos húmedos del Pacífico, reteniendo la humedad en su vertiente occidental chilena y formando depósitos muy antiguos que se encuentran en el subsuelo profundo. Depósitos más recientes corresponden al Pleistoceno tardío/Holoceno y constituyen los denominados loess primarios, suelos de origen eólico que fueron depositados en ciclos cuaternarios de baja pluviosidad con temperaturas elevadas o muy bajas y que conservan su estructura sin sufrir alteraciones (Rocca, Redolfi, & Terzariol, 2006).

Cuando estos suelos sufren alteración in situ se denominan loess secundarios, que son sedimentos conformados sobre la base de un loess, compactados o cementados por procesos postdeposicionales. Dentro de las modificaciones postdeposicionales sufridas por el loess se han reconocido la meteorización superficial con descalcificación producida por acción meteórica, oxidación de sustancias orgánicas, disolución de sales solubles y concentración de éstas en varias formas (concentración del carbonato en capas calcáreas y concreciones aisladas denominadas tosquillas o muñequitas de tosca) (Quintana Crespo, 2005).

En estos sedimentos, denominados genéricamente como de formación Pampeana o Pampeanos, predominan partículas minerales de origen volcánico originadas en los Andes centrales y en la Patagonia, que fueron transportadas por agentes erosivos como glaciaciones y fluviales hacia el norte de la Patagonia y de allí por la acción de los vientos hacia el centro del país (Rocca, Redolfi, & Terzariol, 2006). Para los sedimentos eólicos pampeanos existen dos orígenes complementarios de los materiales constitutivos: uno basado en la intensa



actividad volcánica explosiva andina y otro caracterizado por la acción eólica sobre las sierras pampeanas (Quintana Crespo, 2005).

Debido a corrientes descendientes de los vientos se produjo el asentamiento de las partículas de polvo sobre la superficie terrestre y luego por diversas causas como el humedecimiento por lluvias, nieve, congelamiento, actividad biológica, etc., se formó el loess. Partículas arenosas fueron arrastradas por saltación desde los campos de hielo de la cordillera, cubriendo una planicie arenosa denominada mar de arena, que está constituida por arena fina a limosa con arcillas predominantemente del grupo de las illitas (figura 2.1).

Estos suelos son formados por partículas muy finas de arena, limos y arcillas transportadas por acción eólica (Zárate, 2003) y presentan una estructura abierta, cuyo arreglo de partículas está compuesto por una fracción granular unida entre sí a través de materiales cementantes (sales, partículas de arcilla, carbonatos y silicatos). La fracción de arena está compuesta principalmente por plagioclasas, cuarzo, ortoclasas, vidrios volcánicos, labradorita, feldespatos alterados, fragmentos de rocas volcánicas y ópalos orgánicos (Francisca, 2010). La fracción de limo, respecto a la anterior varía en la angulosidad de las partículas, el incremento en la proporción de vidrios volcánicos y la presencia de montmorillonita e illita (Teruggi, 1957).

El fenómeno de colapso en suelos loésicos es una de sus características geotécnicas más estudiada, e indica un proceso rápido de derrumbe de la fábrica macroporosa, por ablandamiento de los vínculos intergranulares, debido a un incremento en las condiciones de humedad (Quintana Crespo, 2005) o cambios tensionales.

Estos suelos poseen una estructura macroporosa, es decir una fábrica con gran cantidad de vacíos, lo que permite reducir su volumen de manera importante. Procesos como la compactación llevan al suelo hacia una mayor estabilidad estructural.

La cohesión de sus partículas está dada por la presencia de cementantes que se ablandan con la saturación del suelo produciendo asentamientos de sus partículas. El contenido de humedad de estos suelos varía entre un 8 y un 25% y su límite plástico entre un 16 y 20% (Rocca, Redolfi, & Terzariol, 2006). Su escasa fracción arcillosa hace que su plasticidad sea moderada.



2.1. Conducción Eléctrica de los Suelos.

La conductividad eléctrica de los suelos surge a partir del movimiento de iones, que se desplaza de su posición original por un aplicado campo eléctrico, es decir, la conducción es de tipo electrolítica. Los factores que afectan la conductividad eléctrica en suelos y rocas son: relación de vacíos, el grado de saturación, la estructura del suelo y la tela, la concentración de sal del poro fluido, y la temperatura.

En la conducción electrolítica, los átomos o iones que componen el material conductor no intervienen en el proceso, y excepto por su vibración respecto de sus posiciones de equilibrio permanecen en sus lugares. Aquí, la transferencia electrónica tiene lugar por migración iónica que involucra un transporte de materia de una parte del material conductor.

El fenómeno de conducción electrolítica en los suelos está ampliamente descrito en (Rinaldi & Cuestas, 2002). Allí, la conductividad eléctrica " σ_0 " se define como el coeficiente que relaciona el gradiente de potencial " ΔV_e " y la densidad de corriente eléctrica " i ":

$$i = \sigma_0 \Delta V_e$$

Esta ecuación es la bien conocida ley de Ohm y puede ser considerada válida en conductores iónicos, cuando un tipo de carga es móvil, o a frecuencias suficientemente altas, donde las diferentes cargas pueden desplazarse, pero no hay tiempo para cambios, para acumularse en los electrodos o para crear concentración de gradientes (polarización).

En suelos gruesos, donde la carga superficial de las partículas es despreciable, los iones se pueden desplazar a través de los poros con poca interacción. La conducción eléctrica en los suelos es gobernada principalmente por la naturaleza del fluido de poro, relación de vacíos y grado de saturación. En suelos de granulometría fina, la conducción eléctrica se vuelve más compleja ya que se desarrollan capas dobles alrededor de partículas de tamaño coloidal con superficie de carga negativa (Rinaldi & Cuestas, 2002).

En la figura 2.2 se muestra la superficie de una partícula de arcilla y la posición de los iones en solución, donde la capa interna se forma con iones de signo contrario fuertemente adsorbidos en la superficie de la partícula por fuerzas electrostáticas y de van der Waals. En general, es conocido (Shaw, 1970) que un plano localizado a una distancia equivalente al tamaño de los iones hidratados divide la doble capa. La capa interna es formada por iones de signo contrario fuertemente adsorbidos a las superficie de la partícula por fuerzas electrostáticas y de Van der Waals. Más allá de este plano se extiende la doble capa difusa.

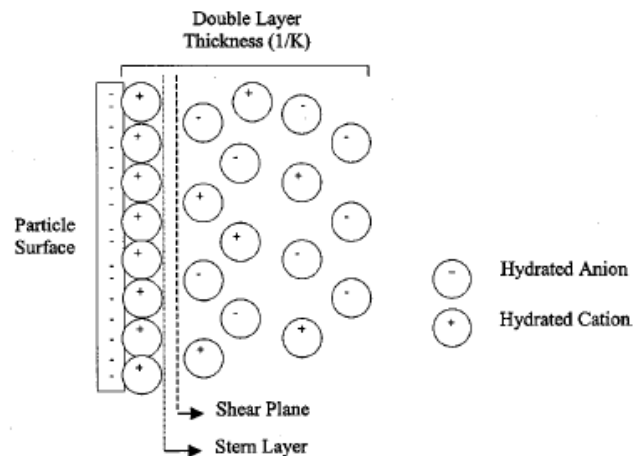


Figura 2.2. Modelo de doble capa alrededor de una partícula de arcilla. (Rinaldi & Cuestas, 2002)

Cuando se aplica un potencial electro cinético, los iones de la doble capa se desplazan a lo largo de un plano conocido como plano de corte. La interacción de los iones a lo largo de este plano reduce su movilidad dándole a las partículas una conductividad equivalente que contribuye al total de la conducción. Sin embargo, la contribución del electrolito y de las partículas no puede ser sumada directamente.

A frecuencias por debajo de unos cuantos kHz , los iones de la doble capa siguen la variación del campo eléctrico y la conducción de las partículas puede ser considerada como óhmica. A grandes frecuencias, los iones de la doble capa no pueden seguir las variaciones del campo eléctrico, la energía es disipada, y la conductividad se incrementa. Por lo tanto, la conducción y las pérdidas polares contribuyen a la conductividad eléctrica de los suelos (σ_s^*). En notación compleja, la conductividad es escrita como (Rinaldi & Cuestas, 2002):

$$\sigma_s^* = \sigma_0 + j \epsilon_0 K^* \omega$$

Donde σ_0 es la conductividad óhmica a baja frecuencia o a frecuencias mucho menores que las correspondientes al fenómeno de relajación; $k^* = k' - j k''$ = frecuencia dependiente de la permitividad dieléctrica compleja del medio el cual considera la energía adsorbida y disipada durante el fenómeno de relajación, $k'(\omega)$ y $k''(\omega)$ = permitividades real e imaginaria respectivamente (O'Konski 1959; Schwarz 1962; Schurr 1964; Lyklema et al. 1983).

- ϵ_0 = permitividad del vacío $8,85 \times 10^{-12}$ [F/m]
- j = número complejo (-1) 0.5; y ω frecuencia angular.

K^* es la respuesta dieléctrica del suelo debido a la relajación de la doble capa tal como se puede apreciar en la figura 2.3.

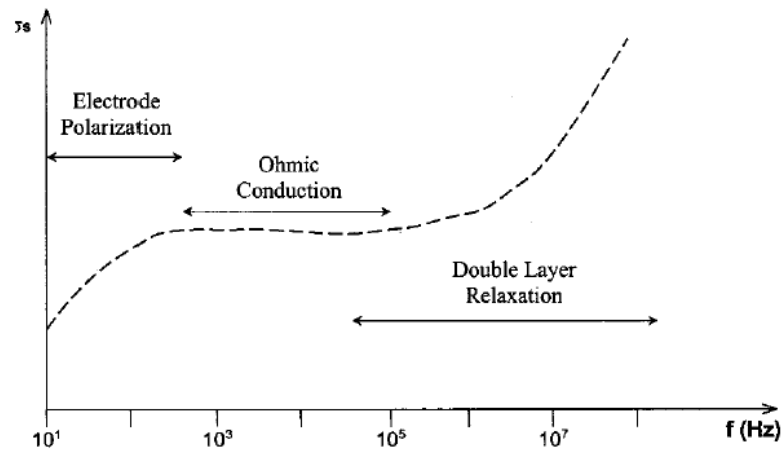


Figura 2.3 Curva típica de la conductividad en suelos arcillosos (Rinaldi & Cuestas, 2002)

En el rango de frecuencia del MHz, se presenta el fenómeno de relajación de k^* debido a la acumulación de cargas eléctricas en las interfaces y bordes de las fases del suelo. Este mecanismo puede ser muy importante en los suelos finos, pero tiene irrelevante importancia en el agua o en arenas húmedas, los suelos secos, y los suelos saturados contaminados con hidrocarburos (Ybañez, Molina, Piumetto, & Carvajal, 2012).

La componente real puede ser determinada introduciendo las componentes real (k') e imaginaria (k'') de la permitividad compleja k^* :

$$\sigma_s = \sigma_0 + j \varepsilon_0 K'' \omega$$

En la mayoría de los suelos, a frecuencias debajo de los 100 kHz, el segundo término de la ecuación desaparece y la conductividad total es gobernada por el término óhmico (σ_0) que es independiente de la frecuencia.

Sin embargo, a muy bajas frecuencias, la polarización del electrodo puede presentarse. Este mecanismo ocurre en suelos, a frecuencias menores a 2 o 3 kHz cuando las mediciones de conductividad se realizan utilizando una celda de 2 electrodos ya que los iones en los mismos no son intercambiados y se acumulan creando una doble capa similar a aquella en la superficie de las partículas coloidales. Esta nueva doble capa reduce la conductividad medida.

A frecuencias entre las correspondientes a la polarización del electrodo y del fenómeno de relajación de la doble capa, la conductividad de los suelos exhibe un comportamiento casi constante. Esta región depende del contenido de agua en los suelos. A grandes contenidos



de agua de extiende por encima de unos pocos megahercios, mientras que para un contenido muy bajo de humedad, casi no se desarrolla una región de conductividad constante.

2.2. Parámetros Eléctricos de los Suelos y Resistividad.

Respecto a la resistividad del terreno se conoce que si bien en general el suelo se considera un conductor eléctrico muy pobre, se dispone de una gran área de conducción, lo que lo transforma en un medio de baja resistencia adecuado para transportar la corriente, Talocchino – Lozano, (2015). La corriente utilizará toda el área transversal disponible para propagarse por el suelo y es por ello que se debe comprender cuales son los factores que influyen en la resistividad del terreno, sin duda el parámetro más importante de los sistemas de puesta a tierra.

Los suelos poseen muchas características físicas, pero en el presente trabajo solo se explicitarán solo aquellas que modifican a la resistividad de algún modo. Son los que se denominan parámetros eléctricos de los suelos.

Los diversos factores que afectan la conductividad eléctrica de los suelos: relación de vacíos, grado de saturación, estructura de suelo y fábrica, concentración de sal en el fluido de poro y temperatura (Rinaldi & Cuestas, 2002).

Cabe destacarse que las zonas superficiales en que se instalan las tomas de tierra no son uniformes y, además, están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas.

García Márquez, en su publicación sobre puesta a tierra afirma que todo lo nombrado en el párrafo anterior hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del terreno:

- La composición.
- Las sales solubles y su concentración.
- El estado higrométrico.
- La temperatura.
- La granulometría.
- La compacidad.
- La estratigrafía.

Además como es conocido por lo estudiado en los cursos de electrotecnia y física, la impedancia es variable según la frecuencia, por lo que dicha será determinante en el valor final de resistividad del suelo.



2.2.1. Variación de los Parámetros con Respeto a la Frecuencia.

Tanto la resistividad " ρ " [Ωm], como la permitividad " ϵ " [F/m] son altamente dependientes de la frecuencia (Moreno, García, Gómez, Velilla, Valencia – 2002). Se puede apreciar en la figura 2.4 la resistividad eléctrica, disminuye a medida que aumenta su frecuencia.

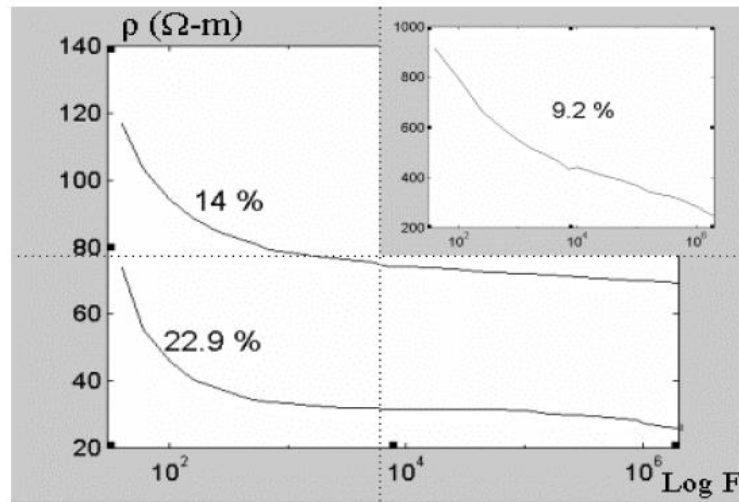


Figura 2.4. Variación de la resistividad de un suelo con la frecuencia, para distintos grados de humedad (Moreno, García, Gómez, Velilla, Valencia – 2002).

Como se puede apreciar en la figura anterior, la resistividad es altamente dependiente de la frecuencia, especialmente para frecuencias inferiores a $1000 [Hz]$, punto en el cual aproximadamente la resistividad se hace asintótica con la frecuencia.

Esto no es de menor importancia debido a que el interés radica en evaluar distintos tipos de sistemas de puesta a tierra a frecuencias industriales del orden de las decenas de Hertz, donde como se vio, la variación de la frecuencia afectará marcadamente la resistividad del terreno, lo cual traerá reflejado un aumento de la resistencia de puesta a tierra de un sistema.

Por otro lado y como se mencionó en párrafos anteriores la permitividad también varía con la frecuencia, lo muestra la figura 2.5.

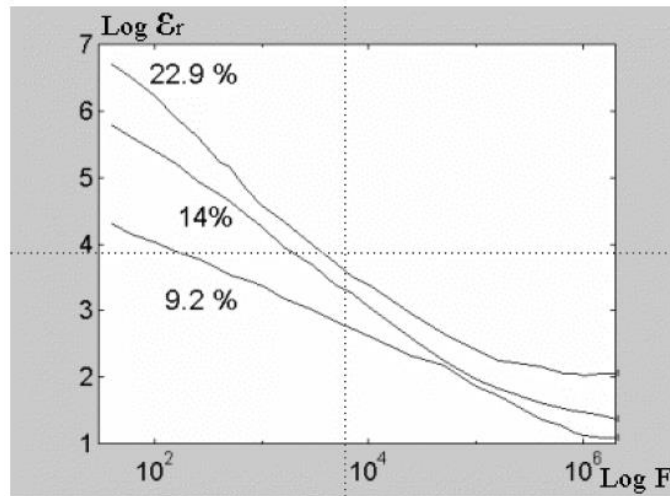


Figura 2.5. Variación de la permitividad de un suelo con la frecuencia, para distintos grados de humedad (Moreno, García, Gómez, Velilla, Valencia – 2002).

En este caso, se puede apreciar que la variación de la permitividad respecto a la logaritmo de la frecuencia es prácticamente lineal, sobretodo en la zona de frecuencias de estudio del presente trabajo.

2.2.2. Porcentaje de Humedad en los Suelos.

García Márquez, (1999) plantea que el contenido de agua o humedad del suelo incide apreciablemente en su resistividad. El principal efecto del agua es disolver las sales solubles presentes en el terreno.

Debe recordarse que el valor no es constante, pues varía en distintos puntos de la zona, dependiendo de la época del año, de la cantidad de precipitaciones promedio anuales, de la radiación solar. En el caso de abstraerse de todas estas variables, y suponiéndolas constantes, el porcentaje de humedad varía según la profundidad, haciéndose cada vez más pronunciado su porcentaje a medida que dicha profundidad aumenta.

A medida que el grado de humedad aumenta, cuyo principal efecto es disolver las sales solubles como se mencionó anteriormente, la resistividad disminuye con rapidez, pero a partir de valores próximos al 15%, esta disminución se hace menos marcada y asintótica a un valor final, como se puede ver en la siguiente figura 2.6 y 2.8.

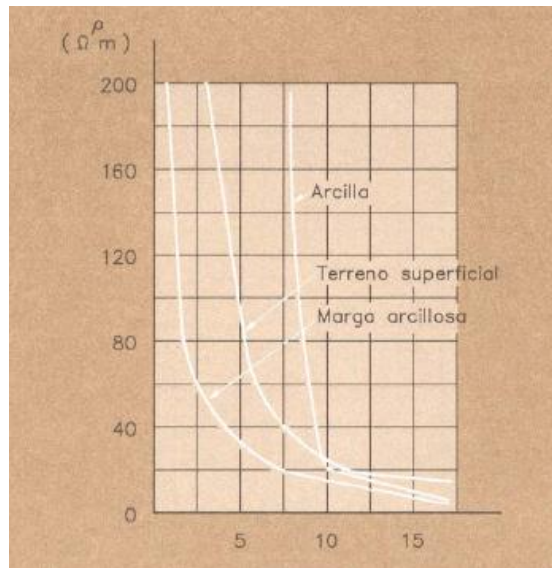


Figura 2.6. Variación de la resistividad con el porcentaje de humedad (García Márquez, 1999).

2.2.3. Temperatura en los Suelos.

La resistividad del terreno aumenta a medida que aumenta la temperatura, y este aumento tiene un punto de clavo en los $0 [^{\circ}C]$, García Márquez, (1999), afirma que mientras es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se reduce el movimiento de los electrolitos, fenómeno influyente fuertemente en el valor final de resistividad, aumentando así la resistividad del terreno. Esto se puede apreciar en las figura 2.7 y 2.8.

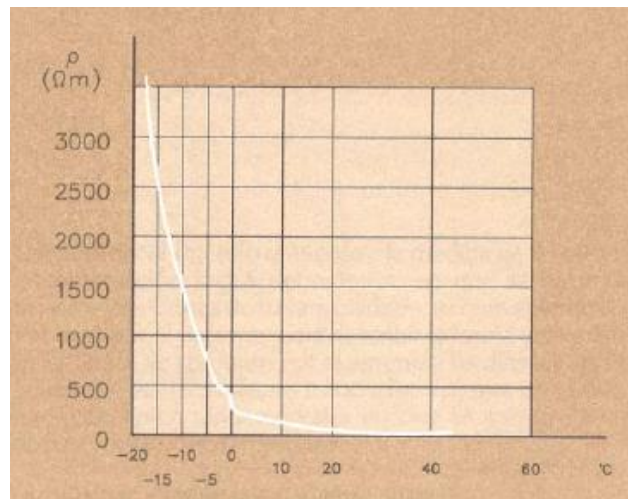


Figura 2.7. Variación de la resistividad del suelo según la temperatura (García Márquez, 1999).



En contraparte, al aumentar la temperatura, incrementa la solubilidad de las sales en el agua contenida en el suelo, lo cual favorece a la conductividad eléctrica el mismo.

2.2.4. Concentración de Sales Disueltas.

La presencia de sales en los suelos reduce significativamente su resistividad. Debido al fenómeno electrolítico el agua disocia las sales en iones, cationes y aniones permitiendo que por ella circulen los electrones producidos en la disociación de las sales. Cuanto mayor sea la concentración en el medio electrolítico, constituido por las sales disueltas en el agua ocluida en el terreno, mayor será la conductividad del mismo y menor será la resistividad del terreno, según afirma la AEA 90364-7-771, 2006.

La siguiente figura 2.8, extraída de la norma internacional IEEE Std. 80, (2000) muestra lo nombrado en el párrafo anterior.

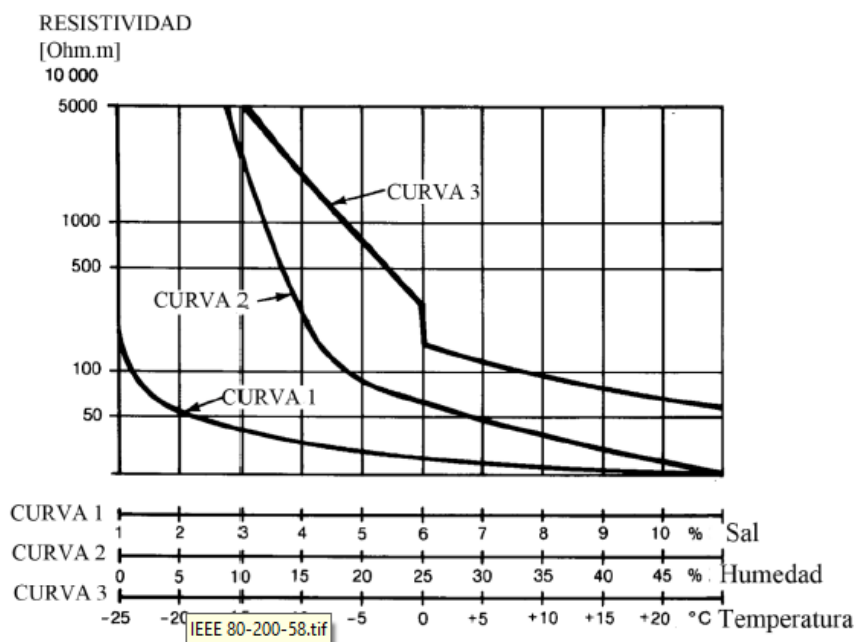


Figura 2.8. Variación de resistividad del suelo en función de sales disueltas, humedad y temperatura IEEE Std. 80, (2000).



2.2.5. Variación de la Resistividad según la Granulometría.

García Márquez, (1999), explica que la granulometría influye sobre la resistividad del terreno. Esto porque según tenga una granulometría más grande o más fina, existirán más o menos espacios para retener agua.

Al aumentar el tamaño de grano, la circulación hidráulica tiene mayor caudal y por tanto el terreno puede retener menos agua. Por lo tanto una granulometría más gruesa tiene mayor resistividad que una fina que puede retener agua, que, como fue explicado en el punto 2.2.2 da lugar a disolución de sales favoreciendo el movimiento de electrolitos y así favoreciendo la conducción eléctrica.

Además se debe tener en cuenta que tener granulometría fina, permite tener un contacto más íntimo entre el suelo y el electrodo, disminuyendo así la resistencia de contacto entre ellos.

2.2.6. Estratigrafía.

Puede encontrarse en la práctica que en un suelo, a medida que varía la profundidad existan diferentes capas o estratos de distintos espesores y hasta formadas por distintos materiales Talocchino – Lozano, (2015). Entonces la resistividad total del terreno será la resultante de las diferentes capas encontradas en el terreno en estudio.

Por tanto para realizar un estudio de resistividad adecuado en un terreno en que se va a sumergir un sistema de puesta a tierra, deberá tenerse en cuenta este factor a la hora de realizar mediciones y cuantificar el valor de resistividad del terreno.

García Márquez, 1999, explica que las capas más superficiales experimentan fuertes variaciones de resistividad dependiendo de las condiciones externas, mencionadas las precipitaciones y temperatura, las cuales varían a lo largo de la hora del día y de la época del año.

2.2.7. Composición del Terreno.

La variación de resistividad con respecto a la composición del terreno es muy marcada, presentándose además la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están muy bien delimitadas, y que para una misma clase de suelo situado en diferentes parajes, la resistividad suele ser sensiblemente distinta.



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
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silícea	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
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
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

Tabla 2.1. Resistividades promedios para distintos tipos de suelos (García Márquez, 1999).

2.2.8. Sales Solubles y Concentración de las Mismas.

Se conoce que los principales componentes del suelo, tienen carácter aislante, por lo que la conducción en el suelo tiene carácter electrolítico. Esto implica que la circulación de corriente eléctrica se produce debido al movimiento de iones formados por las sales que se disuelven en el agua contenida en el suelo.

Puede observarse en la siguiente figura 2.9 como el aumento en la concentración de sales, disminuye el valor de resistividad del terreno.

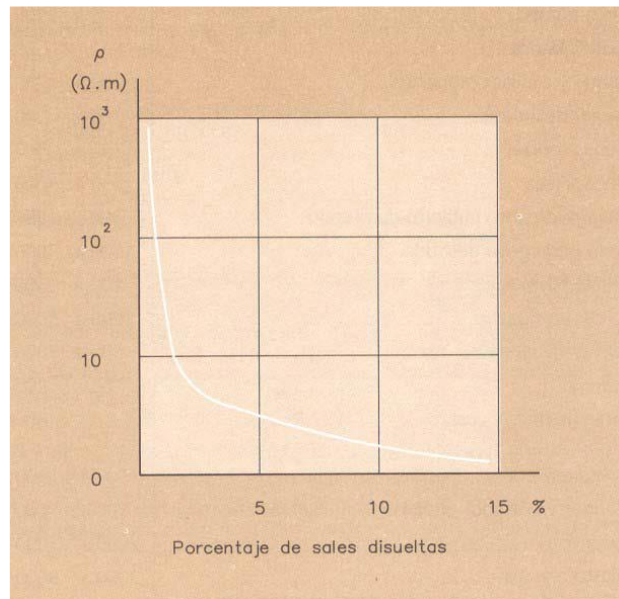


Figura 2.9. Variación de la resistividad según el porcentaje de sales disueltas (García Márquez, 1999).

Además, existen diferentes tipos de sales que, suponiendo una misma temperatura, se disocian en mayor o menor medida en el agua, generando así mayor o menor cantidad de iones respectivamente. Favoreciendo más a la conducción eléctrica lo que se disocian produciendo más iones. Este fenómeno puede apreciarse en la siguiente figura 2.10.

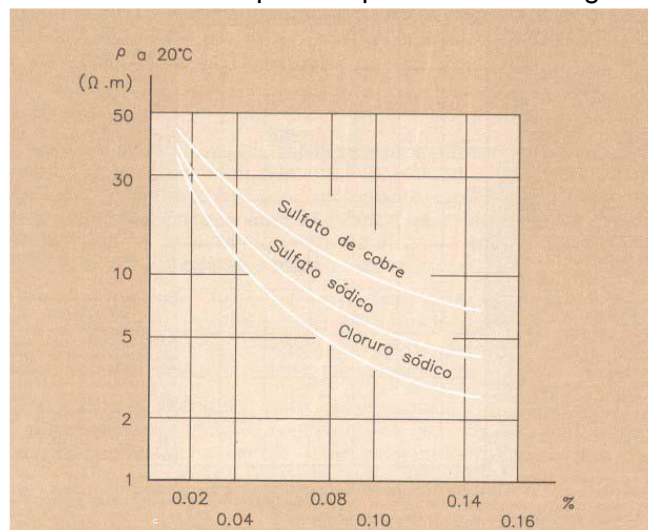


Figura 2.10. Variación de la resistividad según el porcentaje y tipo de sales disueltas (García Márquez, 1999).



2.2.9. Compactación.

La compactación de los suelos afecta su resistividad ya que incide en su mayor o menor conservación de humedad. La resistividad del terreno disminuirá al aumentar la compactación, que a su vez debe garantizar un contacto directo entre el electrodo y la tierra. Esto es debido a que, en un suelo compacto es más fácil la retención de agua en sus poros (Talocchino – Lozano, 2015).

2.3. Polarización.

Típicamente se puede introducir el concepto de polarización explicando que si un material contiene moléculas polares, estarán normalmente en una orientación aleatoria cuando no tiene un campo eléctrico aplicado. Si se aplica un campo eléctrico, polarizará al material, orientando los momentos de dipolos de las moléculas polares. Esto disminuye el campo eléctrico efectivo entre las placas disminuyendo la circulación de corriente y aumentará la capacidad en una disposición de placas paralelas. La siguiente figura 2.11 esquematiza lo antes mencionado.

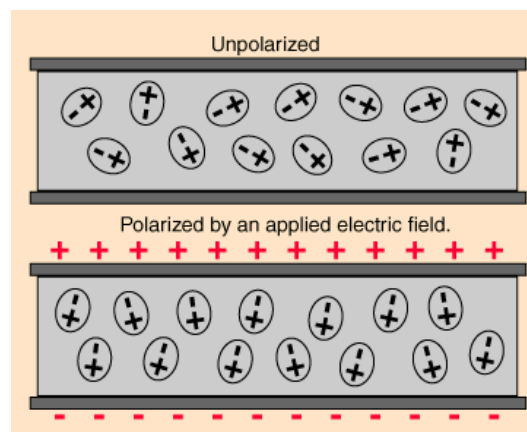


Figura 2.11. Esquema de polarización de un material al aplicarle un campo eléctrico.

A distintas frecuencias ocurren distintos mecanismos de polarización, los cuales pueden ser resumidos de la siguiente manera (Von Hippel, 1954):

- Polarización electrónica.
- Polarización atómica.
- Polarización por orientación.
- Polarización espacial.



En la polarización electrónica ocurre el desplazamiento relativo de los electrones de un átomo respecto del núcleo cargado positivamente cuando se aplica un campo eléctrico. Como consecuencia de ello, se produce una orientación de los centros de las cargas en la dirección del campo eléctrico como se puede apreciar en el esquema de la figura 2.12. Este tipo de mecanismo de polarización que ocurre en el espectro de frecuencia aparece como un fenómeno de resonancia y ocurre a frecuencias próximas a 10^{16} [Hz], (Francisca, 2001).

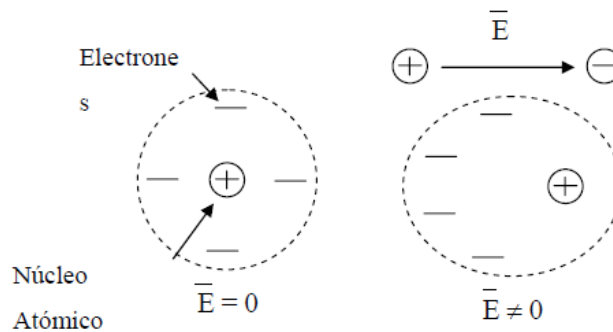


Figura 2.12. Fenómeno de polarización electrónica (Francisca, 2001).

La polarización atómica representa el desplazamiento relativo de átomos de distintos tipos que forman una molécula. Ante la presencia de un campo eléctrico, los átomos tienden a cambiar su posición de equilibrio tal como se esquematiza en la figura 2.13. El espectro de respuesta de este tipo de mecanismo también corresponde a un fenómeno de resonancia y ocurre a frecuencias próximas a 10^{12} [Hz], (Francisca, 2001).

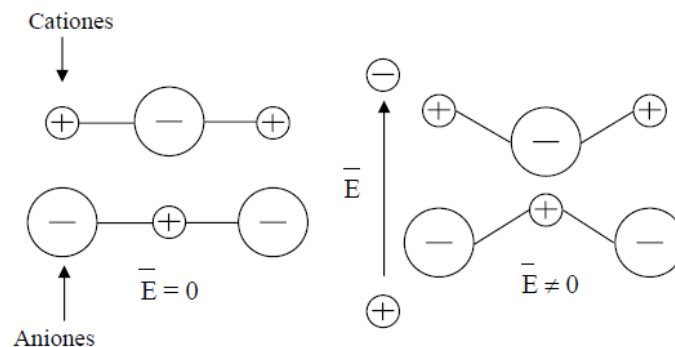


Figura 2.13. Fenómeno de polarización atómica (Francisca, 2001).

La polarización por orientación se debe a una distribución asimétrica entre cargas, y ocurre en materiales con dipolos permanentes. Cuando se aplica un campo eléctrico, se produce una reorientación de esos dipolos, los cuales se orientan según la dirección del campo aplicado como se ve en la figura 2.14. Para cada tipo de dipolo existe una frecuencia para la cual los mismos no pueden seguir la variación del campo eléctrico. En el espectro de



frecuencias, la variación de la permitividad dieléctrica se manifiesta como un fenómeno de relajación (Francisca, 2001).

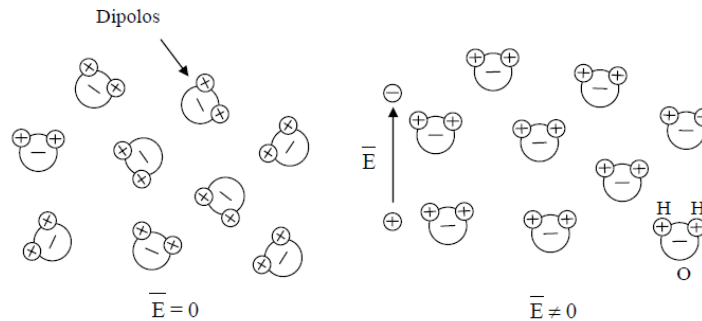


Figura 2.14 Fenómeno de polarización por orientación (Francisca, 2001).

Los tres mecanismos de polarización descritos, tienen lugar en materiales en los cuales los electrones, átomos, y dipolos permanentes están localmente unidos formando parte de la estructura del sólido o del líquido. Distintos autores han realizado estudios teóricos sobre la polarizabilidad de átomos y moléculas describiendo las posibles interacciones entre las mismas. Entre ellos pueden destacarse Debye (1929), Cole y Cole (1941), Von Hippel (1954), Jonscher (1981), Israelachvili (1992) entre otros.

Por otro lado, con respecto a la polarización espacial, en los materiales dieléctricos, cuando se aplica un campo eléctrico se produce un desplazamiento de las cargas o iones en solución que puedan desplazarse libremente. En el caso que estas cargas tengan su movimiento impedido debido a la presencia de interfaces, las mismas se acumulan dentro del material provocando una nueva distribución de cargas o polarización espacial (Von Hippel, 1954). El tiempo requerido para que se produzca el desplazamiento de las cargas depende en general del tipo de material. En los electrolitos los iones pueden moverse libremente, mientras que en los materiales porosos la tortuosidad en los caminos de conducción y la posible interacción entre fases dificultan el movimiento de los iones (Francisca, 2001).

En las mezclas heterogéneas, debido a diferencias en las propiedades dieléctricas de cada uno de los componentes, ocurre una polarización espacial. Además, tienen la propiedad de mostrar relajaciones en el espectro de frecuencias aun cuando cada uno de los componentes no presente este comportamiento. En la siguiente figura 2.15 se esquematiza la polarización espacial.

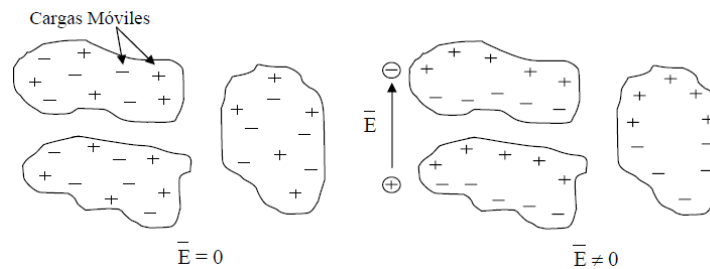


Figura 2.15. Fenómeno de polarización espacial (Francisca, 2001).

Mecanismos de Polarización en Suelos.

Los suelos son materiales heterogéneos constituidos por más de una fase. Los mismos se encuentran constituidos por las partículas o granos (compuestos por diferentes minerales según el origen del suelo), el aire, el agua y la posible presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, la fase sólida puede interactuar con el agua de los poros por lo cual parte de la misma puede encontrarse absorbida a la superficie de las partículas del suelo y parte encontrarse libre o en estado natural. El agua que se encuentra absorbida se encuentra orientada y vinculada a la interface o superficie de la partícula. Además, otras moléculas de agua pueden encontrarse hidratando los iones de las sales presentes en el suelo que satisfacen las cargas de la superficie de las partículas de arcilla o de dimensiones coloidales. Estas moléculas de agua no tienen la posibilidad de rotar o polarizarse libremente por lo cual su permitividad dieléctrica es diferente de la que normalmente le corresponde al agua. Debido a las diferentes propiedades de las partículas de suelo, el comportamiento de los suelos granulares es muy diferente que el de los suelos predominantemente arcillosos, con mayor superficie específica (Francisca, 2001).

En suelos, solo es posible considerar que no hay interacción entre las partículas y agua cuando la cantidad de agua absorbida es despreciable respecto a la cantidad de agua libre. Este caso se presenta en suelos con baja superficie específica $Se \left[\frac{m^2}{g} \right]$ siendo ésta la relación entre el área y el peso de las partículas. Cuando la superficie específica de un suelo es baja (ej. gravas, arenas y limos) las fuerzas gravitatorias resultan de mayor importancia que las fuerzas eléctricas de origen superficial o interfacial. Por otro lado, las fracciones arcillosas de los suelos (fracción cuyo tamaño máximo de partícula es inferior a $0,002 \text{ mm}$) tienen alta superficie específica Se (ej. Lambe y Whitman, 1972; Mitchell, 1993). En el comportamiento de las mismas, las fuerzas gravitatorias son menos importantes que las eléctricas, y debido a la presencia de cargas superficiales en las partículas, se desarrollan importantes dobles capas alrededor de las mismas. Esta doble capa está formada por iones hidratados y moléculas de agua absorbidas en la superficie mineral (denominada capa de Stern), y por una región exterior a la anterior en donde los mismos tienen mayor movilidad y están ordenados de manera de satisfacer las cargas eléctricas (parte difusa de la doble capa).



Para el caso de la provincia de Córdoba, y el suelo loésico propio de esta zona, podemos ver que está compuesta por limos eólicos (limos 71-81%, arcilla 13-29 %, arenas 1-6 %) como se puede apreciar en la siguiente figura 2.16 (Rocca, Redolfi, Terzariol - 2006).

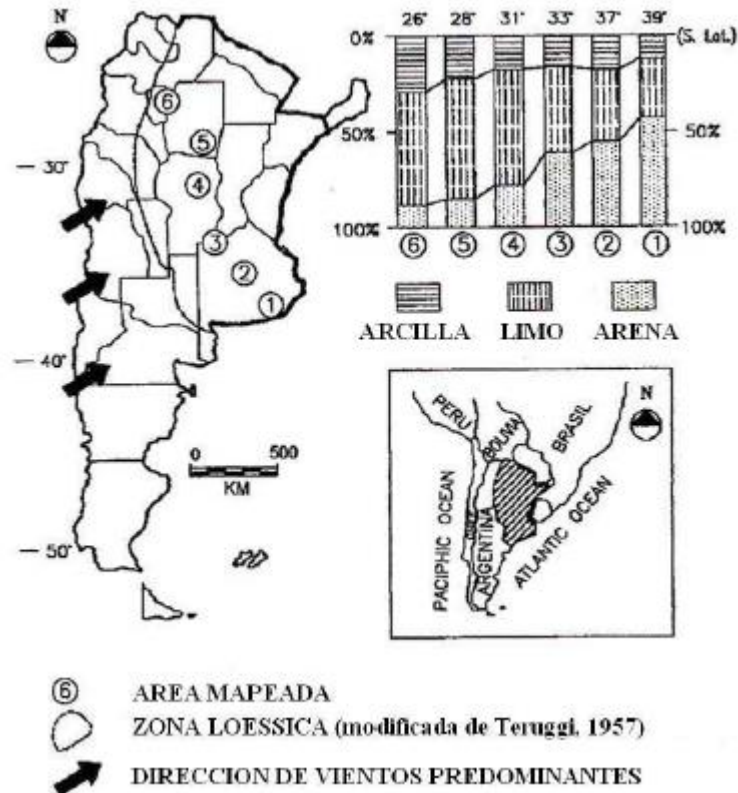


Figura 2.16 Composición de Loess para distintas regiones de Argentina (Rocca, Redolfi, Terzariol - 2006).

Debido a que el mayor porcentaje que presenta este suelo en su composición es limo y arena fina se deberá tomar al loess como un suelo de baja superficie específica.

Mecanismos de Polarización en Suelos con Superficie Específica Baja.

En este tipo de suelo es posible observar a distintos intervalos de frecuencia la aparición de diferentes mecanismos de polarización. A muy baja frecuencia ocurre un mecanismo de polarización espacial debido a las cargas presentes en el electrolito de los vacíos del suelo.



Esta polarización espacial de cargas ocurre debido a que los iones en solución pueden desplazarse libremente por los poros sin interactuar con las partículas. Los aniones (cargas negativas) y los cationes (cargas positivas) se trasladan en direcciones opuestas por lo cual es posible observar una polarización espacial de cargas. En general, para las arenas la polarización espacial ocurre en frecuencias inferiores al kHz. Sin embargo, la frecuencia a la cual se observa esta polarización de cargas depende de los caminos de conducción y de la resistencia que encuentren los iones para desplazarse libremente (Francisca, 2001).



CAPITULO 3:





1. Perfil de Resistividad del Suelo Loésico según el Contenido de Sales Disueltas.

Como se ha mencionado anteriormente el presente trabajo busca profundizar y complementar el trabajo de Talocchino - Lozano, (2015). En este capítulo se pretende realizar un estudio que permita conocer y describir la variación de la resistividad eléctrica de un suelo loésico, en función del porcentaje de sales presentes en dicho suelo, ya que como se vio en el capítulo 2, es un factor que incide notablemente sobre la resistividad.

Las sales solubles en agua, como se explicó en el punto 2.2.8 del capítulo 2, son las que forman cationes y aniones, las cuales al estar en presencia de un campo eléctrico producen la circulación de una corriente iónica. También se explicó en dicho punto, que el porcentaje y tipo de estas sales también son factores incidentes en el comportamiento eléctrico del suelo.

Para hacer un estudio que represente de manera más exacta la realidad, se trabajó con muestras de suelo inalteradas.

2. Determinación del Porcentaje de Humedad y Sales en el Suelo Loésico Extraído.

Es fundamental conocer la cantidad de sales que contiene el suelo loésico extraído, pues esta será la base de nuestros posteriores cálculos. Para ello se consultó con el laboratorio de geotecnia de la FCEFyN de la UNC, el cual nos brindó el manual de la cátedra de Geotecnia II, de la nombrada facultad.

2.1. Preparación de Muestra.

Para realizar las mediciones se extrajo una porción de suelo loésico según las condiciones explicadas en el punto 1 del presente capítulo. Se pesa aproximadamente 120 [gr], del suelo.

Luego se disgrega bien este suelo, hasta que pase totalmente por un tamiz N° 40, y se deja secar en horno hasta que el mismo acuse siempre el mismo peso, es decir, que no tenga más humedad que perder. Las siguientes figuras 3.1 a y b muestran los pesos de la muestra antes y después de ser llevadas al horno.



Figura 3.1. a.



Figura 3.1. b.

Además se determinó que el peso del recipiente era de 4,19 [gr].

Con todos estos datos obtenidos se determinó el porcentaje de humedad de la misma manera que se explicó en el punto 2.4 del capítulo 4. Dicha humedad es de 6,08%.

De la muestra “seca” se pesaron 100 [gr], en una probeta de 1000 [ml]. Y luego se agregaron 500 [cc], removiendo cuidadosamente para evitar la formación de grumos. Lo anteriormente nombrado se pueden observar en la figura 3.2. Una vez vertida toda la cantidad de agua destilada, se mezcló enérgicamente durante 5 minutos.



Figura 3.2. Muestra de 100 [gr] de loess para ensayo de salinidad.



Se dejó reposar la muestra de agua destilada y loess durante 24 horas. Una vez transcurrido ese tiempo, los sedimentos decantan en el fondo de la probeta, y se observa la muestra.

2.2. Determinación del Porcentaje de Sales.

Según el manual de Geotecnia II, que sigue la norma E 18 de la Dirección Nacional de Vialidad, si el líquido aparece claro y limpio hay contenido de sales en el suelo. En caso contrario, si el líquido se presenta turbio con presencia de partículas en suspensión, se dice que el líquido no está floculado y esto indica que el suelo tiene un porcentaje de sales inferior al 0,1%. En este caso el ensayo no se sigue. En nuestro caso, y tal como se puede ver en la figura 3.3 el líquido se presenta turbio, con partículas en suspensión. Por lo que el porcentaje de sales disueltas es menor que el 0,1%.



Figura 3.3. Muestra no floculada del ensayo de salinidad.



3. Determinación de la Influencia de la Salinidad en la Resistividad del Suelo.

3.1. Preparación de las Muestras para el Ensayo.

La finalidad de este capítulo, como se explicó anteriormente es conocer la variación de resistividad según el porcentaje de sales solubles en el loess. Para poder medir esta resistividad y que factores como el tamaño de la muestra no influyan, se deberán utilizar muestras del mismo tamaño. Además las muestras fueron extraídas en lugares ubicados uno al lado del otro, y a la misma profundidad, para tratar de que las mismas sean lo más semejantes posibles. Es importante destacar también la heterogeneidad que presenta el loess por ser un suelo cuya formación es función en gran parte de fenómenos eólicos, por lo que se tuvo en cuenta la orientación norte, sur, este y oeste y su correspondencia con los ejes X, Y, Z de las muestras.

Con dicha finalidad, se preparan cuatro muestras a partir de panes inalterados de suelo loésico extraídos de zonas aledañas al laboratorio, estas muestras existentes en estado sólido y con compactación natural inalterada son talladas a mano, hasta darles las dimensiones y la forma de una probeta de acrílico de dimensiones conocidas ($80 \times 80 \times 80$ [mm³]). En la siguiente figura 3.4 se muestra la probeta de acrílico.

Estas muestras, luego serán humedecidas con diferentes soluciones salinas a diferentes concentraciones, hasta ser llevadas a la humedad óptima del suelo de aproximadamente 14,7%. (Talocchino - Lozano, (2015)).



Figura 3.4. Cubo acrílico para tallar muestras inalteradas.



En la siguiente figura 3.5 se observa una de las muestras durante su fabricación. Ya terminada y lista para ser extraída.



Figura 3.5. Cubo acrílico con muestra tallada.

Una vez talladas las cuatro muestras fueron secadas en un horno hasta peso constante, es decir hasta que el porcentaje de su humedad es 0%. Los pesos arrojados en las mediciones en seco de las 4 muestras son:

Muestra	peso en seco [gr]	Humedad inicial [%]
N° 1	607,91	0,00%
N° 2	621,29	0,00%
N° 3	613,99	0,00%
N° 4	626,69	0,00%

Tabla 3.1. Pesos de las muestras en seco.



Conocido el peso inicial de las muestras (en seco) y sabiendo al porcentaje de humedad que se desea llegar (aproximadamente 14,7%), se calcula la cantidad de agua que debe colocarse en cada muestra para lograr dicha humedad final.

Sabemos que:

$$H \% = \frac{(Ph - Ps)}{Ph} * 100$$

Por lo tanto:

$$Ph [gr] = \frac{Ps}{\left(1 - \frac{H\%}{100}\right)}$$

Siendo Ph el peso húmedo, y Ps el peso en seco.

Luego la cantidad de agua a agregar es simplemente la diferencia de $Ph - Ps$. Todos estos cálculos se hacen para determinar el porcentaje en peso de las soluciones salinas con las que se permeará a las muestras, para obtener saltos aproximadamente constantes de salinidad en las muestras, que varíen entre valores cercanos a 0% y cercanos a 1%. Se explicitan los resultados de los cálculos teóricos en la siguiente tabla 3.2:

Muestra	peso en seco [gr]	Humedad inicial [%]	cantidad de agua agregada [gr]	Peso final teórico [gr]	Humedad deseada [%]
N° 1	607,91	0,00%	104,76	712,67	14,70%
N° 2	621,29	0,00%	107,07	728,36	14,70%
N° 3	613,99	0,00%	105,81	719,80	14,70%
N° 4	626,69	0,00%	108,00	734,69	14,70%

Tabla 3.2. Cantidad de agua a agregar en función de las humedades.



Una vez determinada la cantidad de agua que se debe agregar a la muestra para llegar a humedad óptima, se calcularon los saltos del porcentaje de salinidad que se desean obtener en las muestras. Los cuáles serán función del peso de la muestra, de la cantidad de agua a agregar, de la salinidad inicial de dicha muestra y de la concentración de sal de las soluciones que se deben preparar. Cómo es evidente el peso de las muestras no se puede variar, tampoco se puede variar la cantidad de agua a agregar, puesto que esta es necesaria para llegar a la humedad óptima. Y el estado inicial de salinidad resulta poco práctico para ser modificado. Por estos motivos, se los deja constante y es entonces la salinidad final solo función de la concentración de sale de las soluciones con que se humedecerá la muestra.

El porcentaje de sal (en peso) se calcula como:

$$S \% = \frac{s [gr]}{Ps [gr]} * 100$$

Luego

$$s [gr] = \frac{S\%}{100} * Ps [gr]$$

Siendo “s” la cantidad de sal en una muestra.

Como se determinó en el ensayo de salinidad del punto 2.2 del presente capítulo, el porcentaje de salinidad es menor que el 0,1 %. Por lo que se toma este valor como referencia, sin este introducir errores groseros en el cálculo.

Considerando todos estos parámetros (cantidad de agua a agregar, salinidad inicial y final, saltos constantes de salinidad, peso de la muestra) se realizaron cálculos estimativos utilizando tabla de cálculo Excel con diferentes juegos de valores, determinando así que se utilizarían las siguientes soluciones salinas de NaCl:

Solucion salina		
Cant. NaCl	Cant. Agua	% en peso
0	250,00	0,00%
4	252,70	1,56%
10,22	250,98	3,91%
15	250,00	5,66%



Tabla 3.3. Soluciones salinas.

Luego se humedeció las muestras, agregando las soluciones salinas en la cantidad en peso indicada en la tabla 3.3 y llegando así hasta valores próximos de la humedad deseada. Las muestras fueron humedecidas con un rociador agregando las soluciones con suavidad y de manera periódica durante un día, y luego se dejaron reposar 48 horas para lograr homogeneidad de humedad y salinidad a lo largo y ancho de toda la muestra. Se las peso nuevamente y se recalcularon valores de humedad, y salinidad. Estos valores se muestran en la tabla 3.4 a y b.

Muestra	Peso inicial		Peso Final		humedad		Cantidad De agua		
	C/ Bandeja	S/ Bandeja	C/ Bandeja	S/ Bandeja	Inicial	Final	Inicial	Final	Se agregaron
N° 1	614,22	607,91	719,3	712,99	0,00%	14,74%	0,00	105,08	105,08
N° 2	627,60	621,29	734,9	728,59	0,00%	14,73%	0,00	107,30	107,30
N° 3	620,30	613,99	726,3	719,99	0,00%	14,72%	0,00	106,00	106,00
N° 4	633,00	626,69	741,7	735,39	0,00%	14,78%	0,00	108,70	108,70

Tabla 3.4 a.

Salinidad inicial	Solucion salina			Agua agregada	Cantidad de sal			Salinidad final
	Cant. NaCl	Cant. Agua	% en peso		Inicial	Agregada	Final	
0,10%	0	250,00	0,00%	105,08	0,608	0,00	0,608	0,10%
0,10%	4	252,70	1,56%	107,30	0,621	1,67	2,293	0,37%
0,10%	10,22	250,98	3,91%	106,00	0,614	4,15	4,761	0,78%
0,10%	15	250,00	5,66%	108,70	0,627	6,15	6,780	1,08%

Tabla 3.4. b.



3.2. Medición de Resistividad de las Muestras.

Como se explica en el capítulo 2 de este trabajo, el suelo loésico tiene origen eólico y como es de esperarse entonces tendrá cierta heterogeneidad y orientación de sus partículas, por lo que es de interés medir la resistividad en los 3 ejes, que tienen una correspondencia obvia con la profundidad y los ejes cardinales.

El eje “x” corresponde al eje “N-S” (Norte-Sur), el eje “y” al “E-O” (Este-Oeste) y el eje “z” a la profundidad del terreno. Las mediciones se realizaron a temperatura constante (25 °C) utilizando un analizador de impedancia SR715 (Stanford Research Systems) en el rango de 100 Hz a 10 kHz. Los valores obtenidos de dichas mediciones se explicitan en el anexo “Medición de salinidad”.

Los resultados obtenidos de las mediciones fueron procesados y se realizaron las siguientes tablas que muestran variación de resistividad, según porcentaje de salinidad para distintas frecuencias.

Las gráficas de resistividad e impedancia se muestran en las figuras 3.6 a, b, c, d y e, f, g, h respectivamente.

Gráficos de resistividad y salinidad para distintas frecuencias.

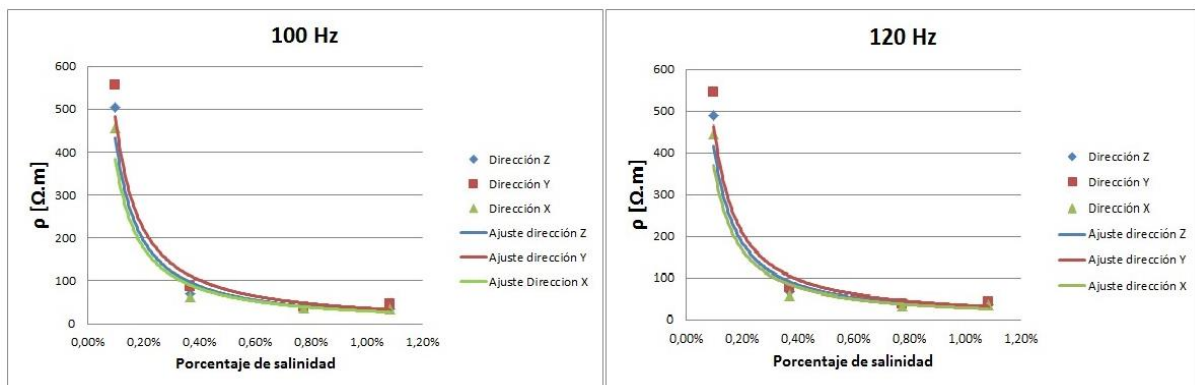


Figura 3.6. a.

Figura 3.6. b.

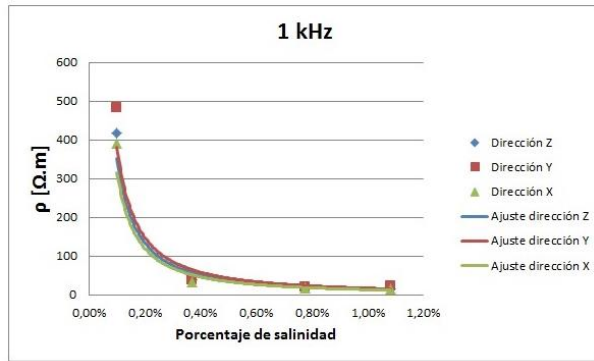


Figura 3.6. c.

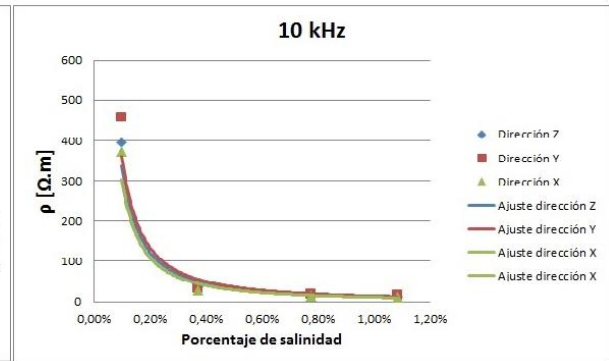


Figura 3.6. d.

Gráficos de impedancia y salinidad para distintas frecuencias.

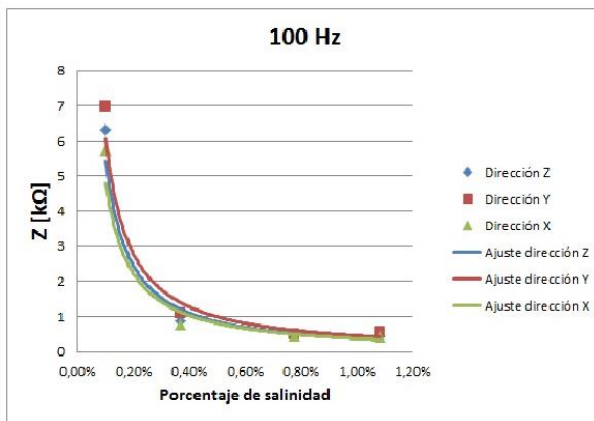


Figura 3.6. e.

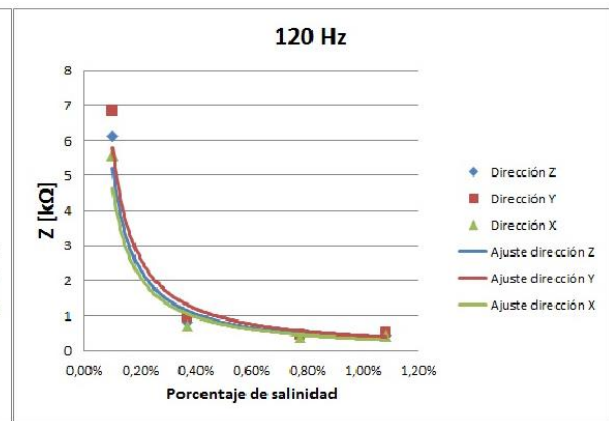


Figura 3.6. f.

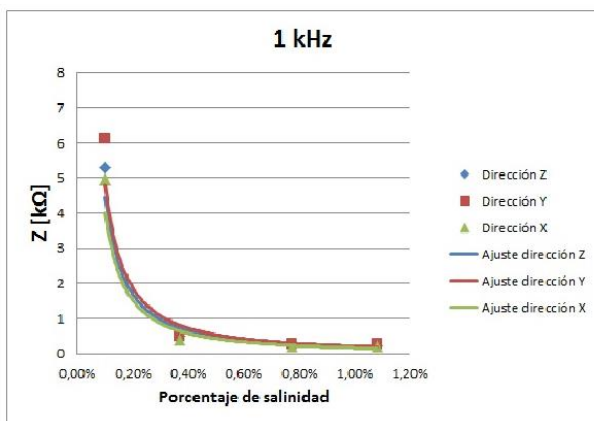


Figura 3.6. g.

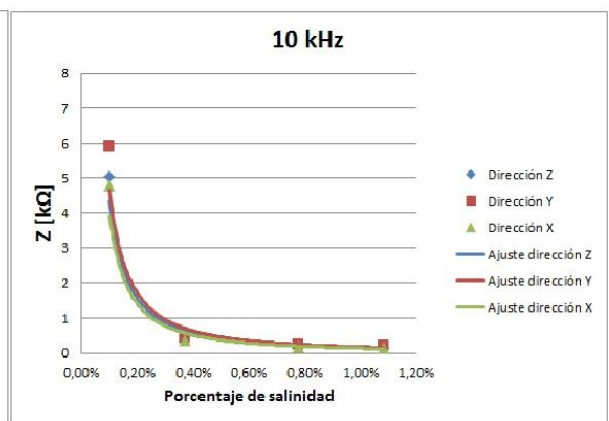


Figura 3.6. h.



3.3. Conclusiones Acerca de las Mediciones Realizadas.

En el anexo citado pertinente a salinidad, se puede corroborar que los valores de reactancia capacitiva están aproximadamente 2 órdenes de magnitud más abajo que los valores de resistencia obtenidos, por lo que no influyen de manera apreciable en el valor de impedancia, siendo este valor a efectos prácticos idéntico a la resistencia.

Al ser el loess un suelo eólico, se presumió que la variación de la resistividad en los distintos ejes del plano horizontal es debida a la orientación del grano del suelo debido al viento.

Se ve claramente que las curvas se encuentran casi superpuestas marcando una clara disminución de la anisotropía con la salinidad.

La resistividad disminuye con el aumento de la frecuencia, siendo este comportamiento más marcado a menores concentraciones de sales.



CAPITULO 4:





1. Introducción a la Modelización del Entorno de Trabajo.

Para estudiar el comportamiento de los SPT sobre los que trata el presente proyecto integrador se hace uso de un cajón impermeable como entorno de trabajo, en él se realizaran las mediciones necesarias sobre los SPT a escala utilizados.

Los SPT estudiados son aquellos que utilizan tanto la EPEC como otras empresas distribuidoras de energía del país para poner a tierra, o aterrizar, las subestaciones transformadoras aéreas (de tipo constructivo monoposte y biposte).

Estos SPT se reproducirán a escala y luego se estudiara su comportamiento al estar inmersos en suelo loésico, característico de la ciudad de Córdoba y zona central del País.

Es necesario contar con un entorno de trabajo controlado, que represente de manera fidedigna el medio donde normalmente se instalan estos SPT en la realidad.

2. Definición del Entorno de Trabajo.

2.1. Cajón Impermeable.

Las mediciones necesarias para llevar adelante el estudio propuesto se realizaran dentro de un cajón impermeable. Estas mediciones se pueden considerar de precisión ya que para efectuarlas se trabaja con corrientes del orden de los miliamperios y tensiones con una precisión de una décima de voltio.

Se deben tener en cuenta además los siguientes aspectos:

- El circuito de medición se encuentra aislado de cualquier otro circuito externo con lo cual se evitan interferencias que se pueden acoplar desde el exterior.
- El entorno de trabajo es estanco y permite mantener la humedad uniforme.
- Las dimensiones físicas del cajón imponen limitaciones para poder estudiar sistemas de puesta a tierra mayores un máximo permitido.

El cajón utilizado es cúbico de madera, con un volumen aproximado de 1 m^3 , esta reforzado en todas sus aristas con planchuelas de acero y lleva zunchos en su perímetro.

Cuenta con un soporte con tacos de madera y con las dimensiones necesarias para poder trasladarlo haciendo uso de una mulita de carga industrial.



Está recubierto internamente con una capa aislante y luego con una capa impermeable para mantener constante el contenido de humedad (véase figura 4.1).



Figura 4.1: Cajón de 104 cm x 115 cm x 100 cm.

2.2. Elección del Modelo de Suelo (Modelo de Suelo Uniforme).

Al estudiar el comportamiento de cualquier SPT, en primer lugar se deben conocer los parámetros característicos del terreno o lugar de emplazamiento del mismo.

Es por ello que interesa determinar la resistividad del suelo en los que estarán inmersos los modelos a escala de los SPT bajo estudio.

Para ello es necesario adoptar un modelo de suelo lo más próximo al suelo real existente.

En la práctica elegir un modelo de suelo es elegir una aproximación de las condiciones del suelo en el momento de hacer las mediciones.

Los modelos de resistividad del suelo más comúnmente utilizados son el modelo de suelo uniforme, el modelo de suelo de dos capas y el modelo de suelo de múltiples capas.

El modelo de suelo de dos capas es a menudo un aproximado de muchas estructuras de suelo, mientras que los modelos de suelo de múltiples capas son utilizados para suelos en



condiciones más complejas (IEEE Std 80, 2000) y muchas veces no se justifica debido a su complejidad.

Un modelo de suelo uniforme por otro lado, se utiliza solo cuando existe una variación moderada en la resistividad aparente y para suelos de características homogéneas, el modelo de suelo uniforme resulta razonablemente preciso (IEEE Std 80, 2000).

Se buscara por tanto determinar si el suelo loésico contenido en el cajón impermeable donde estos SPT se estudiaran, presenta un comportamiento uniforme bajo condiciones controladas de compactación y humedad y al no existir presencia de otros tipos de suelo en el mismo entorno de medición.

Al no existir variaciones estructurales importantes en el suelo estudiado, se estima que las variaciones de resistividad del mismo serán moderadas, más allá de las heterogeneidades localizadas provocadas por la presencia de elementos extraños en cercanías de los SPT bajo estudio. Como se verá más adelante estas heterogeneidades se introducen para lograr una mejor aproximación a la realidad.

Es importante hacer notar la conveniencia de adoptar un modelo de suelo uniforme, puesto que las ecuaciones de tensión de contacto y tensión de paso definidas en la guía de la IEEE Std. 80, (2000) se basan en un modelo de suelo de este tipo.

Sin embargo, como la mayoría de suelos en la práctica no son uniformes dicha guía solo intenta dar un lineamiento que aproxime los suelos a este modelo.

Como ya se dijo, el modelo de suelo uniforme supone que el mismo está compuesto por capas de distintas resistividades cuya variación es moderada.

Se utiliza por lo tanto un valor promedio de la resistividad del suelo, tomando un promedio aritmético de las mediciones de la resistividad aparente de cada una de estas capas que lo compone, como muestra la siguiente ecuación, tomada de la norma IEEE Std. 80, (2000):

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}$$

Donde la sumatoria de resistividades aparentes del numerador se realiza con los valores medidos, para diferentes distancias y profundidades, a través del método de Wenner Alpha y donde “n” es el número de mediciones realizadas.

2.2.1. Alteración del Modelo de Suelo Uniforme.



Como es de esperarse, los SPT de las subestaciones transformadoras instaladas tanto en zonas rurales como urbanas, pueden estar rodeados por distintos tipos de elementos extraños, como ser tuberías de agua, de gas, fibra óptica, etc. Y hasta inclusive las mismas fundaciones de los apoyos que componen las subestaciones.

Por lo tanto y como ya se mencionó se busca recrear estas interferencias en el entorno de trabajo introduciendo heterogeneidades localizadas, para luego a través de las mediciones realizadas sobre el entorno de trabajo, verificar si a pesar de estas interferencias se puede seguir adoptando un modelo de suelo uniforme y tomar valores promedios de los parámetros característicos del entorno sin introducir errores groseros.

La alteración del entorno de trabajo, se logra introduciendo materiales metálicos y de hormigón distribuidos debajo de la superficie como se aprecia en la siguiente imagen.



Figura 4.2: Elementos utilizados para representar las diferentes geometrías e interferencias.

Los prismas de hormigón introducidos representan, como ya se mencionó, los bloques del mismo material utilizados en las fundaciones de los postes que soportan las subestaciones aéreas.



Las medidas de estos bloques han sido escaladas, partiendo de las dimensiones típicas que se usan en la práctica y utilizando hormigón del tipo H17 como exigen las especificaciones técnicas correspondientes.

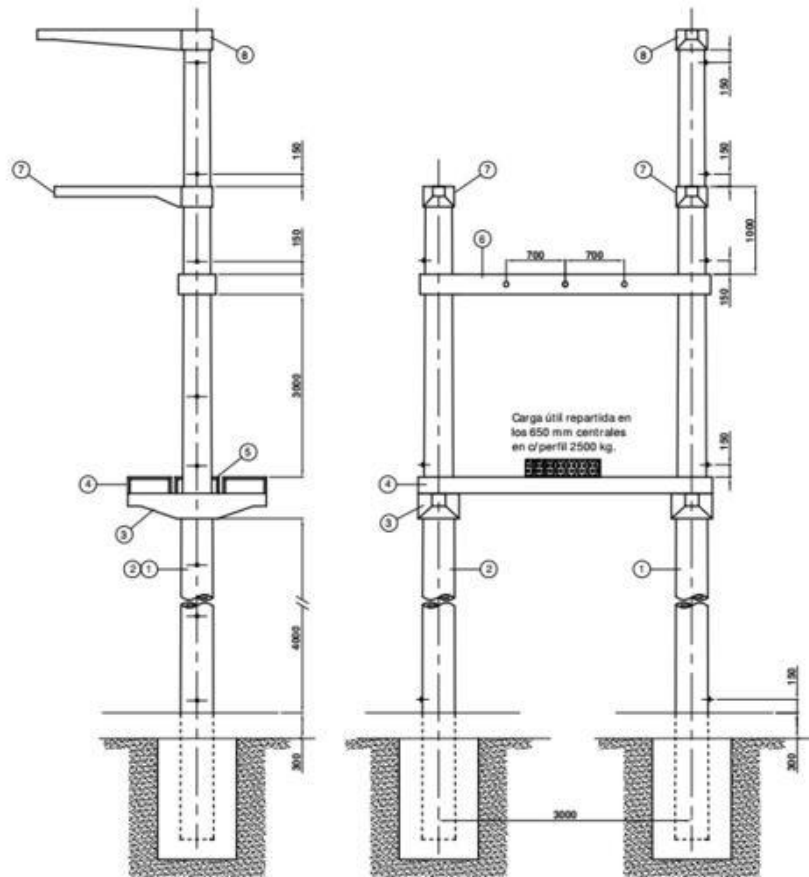


Figura 4.3 a

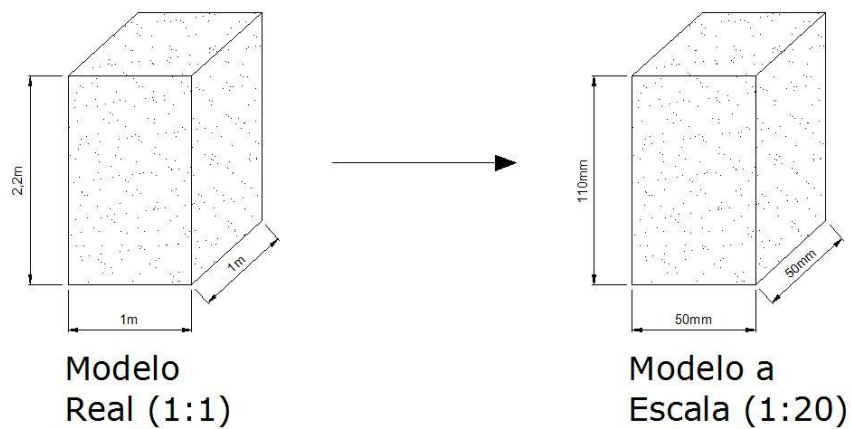


Figura 4.3 b



Para la construcción de los modelos a escala de estas fundaciones se tomaron en cuenta las siguientes hipótesis:

- La resistencia mecánica alcanzada por el modelo no influirá en su comportamiento eléctrico.
- Las dimensiones finales serán solo aproximaciones, pues no se trata de modelos que representen un cuerpo de alta precisión dimensional.

2.3. Limitaciones Dimensionales de los Modelos de SPT.

Las características dimensionales del cajón impermeable fijan el tamaño a escala máximo de los SPT que pueden estudiarse en su interior.

El tamaño de escala elegido para realizar los modelos es de 1:20 como recomienda la IEEE Std. 80, (2000).

Este tamaño de escala permite la realización física de los modelos, evitando que su construcción sea dificultosa y poco precisa.

Por otro lado también asegura que el modelo no sea de dimensiones excesivamente grandes, lo cual implicaría contar con un entorno de trabajo de importantes dimensiones para poder realizar las mediciones requeridas.

Es importante tener en cuenta también los estudios realizados por Carvajal, (2004), estos muestran que para obtener mediciones de resistencia de alta precisión utilizando el método de caída de potencial, es necesario tener una separación entre el SPT bajo estudio y el electrodo auxiliar de corriente del orden de 5 veces la diagonal mayor de la malla del SPT.

Respetando esta condición se puede considerar que los valores de resistencia de puesta a tierra medidos son valores verdaderos.

Mientras que por otro lado la norma IEEE Std. 80, (2000) recomienda que la distancia entre la malla de un SPT y el electrodo auxiliar de corriente sea de 6,5 veces la diagonal mayor de dicha malla al utilizar el método de caída de potencial.

Si bien para lograr precisión en las mediciones es preferible que los SPT sean lo más grandes posibles, se ve claramente que grandes dimensiones en los modelos implican gigantescas dimensiones del entorno de trabajo para poder realizar mediciones de calidad.

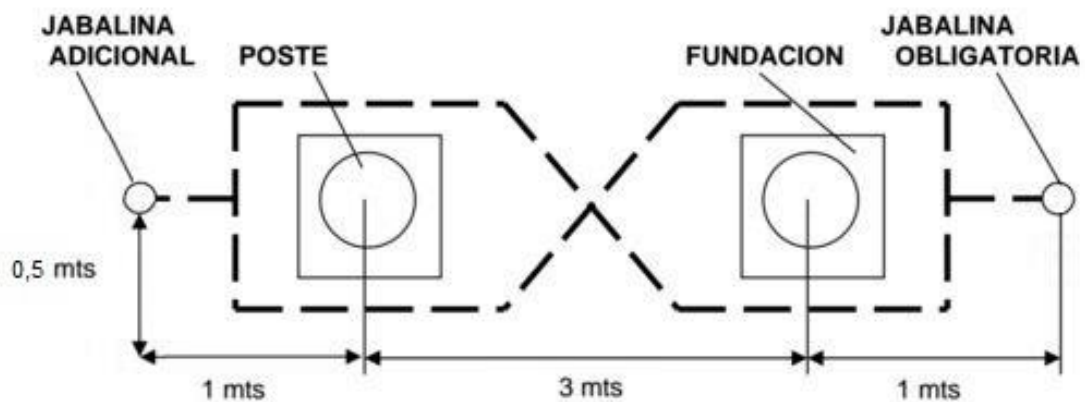


2.3.1. Dimensiones de los Modelos a Escala de los SPT.

Dadas las dimensiones de los SPT especificadas por el tipo constructivo TC1206 de la EPEC, y recordando que el factor de escala escogido es de 1:20, se definen las dimensiones que deberán tener los modelos a escala de los electrodos estudiados.

En la siguiente figura 5.4, pueden observarse las dimensiones recomendadas por el T1206.

MALLA PARA SUBESTACION EN PLATAFORMA (BIPOSTE)



MALLA PARA SUBESTACION EN MONOPOSTE

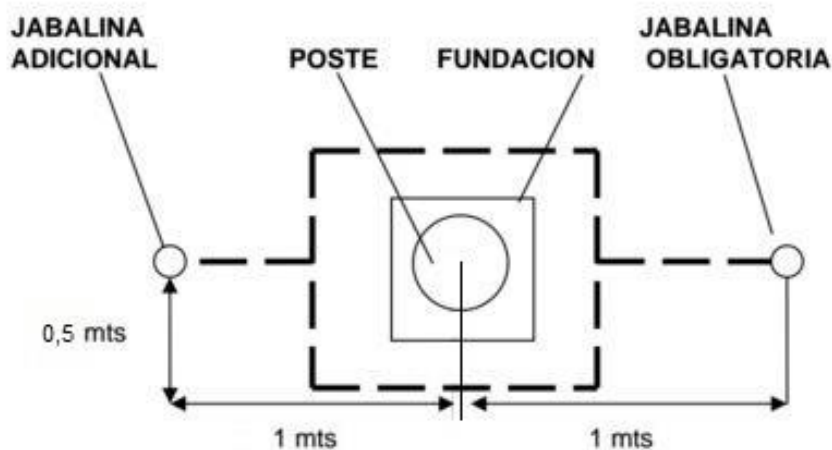


Figura 4.4



Se indican a continuación de manera clara y concisa en las tablas 5.1 a y 5.1 b, las dimensiones tanto de los modelos reales como los escalados y las distancias necesarias de espaciamiento entre electrodos propuestas por Carvajal, (2004) y por la norma IEEE Std. 80, (2000) para realizar las mediciones de resistencia sin efectos de solapamiento.

TC1206					
SPT Monoposte			SPT Biposte		
Dimensiones	Modelo Real	Modelo a Escala	Dimensiones	Modelo Real	Modelo a Escala
Base	1m	50mm	Base	1m	50mm
Altura	1m	50mm	Altura	4m	200mm
Diagonal	1,414m	7,7mm	Diagonal	4,123m	206,2mm

Tabla 4.1 a

SPT Monoposte			SPT Biposte		
Distanciamiento entre electrodos			Distanciamiento entre electrodos		
Carvajal	5xDiagonal	354mm	Carvajal	5xDiagonal	1031mm
IEEE Std. 80	6,5xDiagonal	460mm	IEEE Std. 80	6,5xDiagonal	1340mm

Tabla 4.1 b

Se puede observar que las distancias recomendadas por ambas fuentes, para realizar las mediciones de resistencia con el método de caída de potencial, correspondientes al electrodo utilizado en las subestaciones del tipo monoposte, son posibles de tomarse dentro del entorno de trabajo.

Sin embargo las dimensiones recomendadas para evitar solapamientos en la medición de resistencia del electrodo correspondiente a las subestaciones del modelo tipo biposte, no se pueden tomar dentro del cajón impermeable debido a las limitaciones dimensionales del mismo.

La recomendación que hace la norma IEEE Std. 80, (2000) no es practicable debido a que excede ampliamente las dimensiones del cajón impermeable.

Por otro lado la recomendación de Carvajal, (2004), que es menos conservadora, si bien podría tomarse, se sabe que la resistividad del cajón se eleva demasiado en las inmediaciones de las paredes del mismo, debido a efectos de borde provocados por la escasa compactación, según se demostró por Talocchino-Lozano, (2015), con lo cual las dimensiones resultantes para la separación entre electrodos resulta también impracticable.

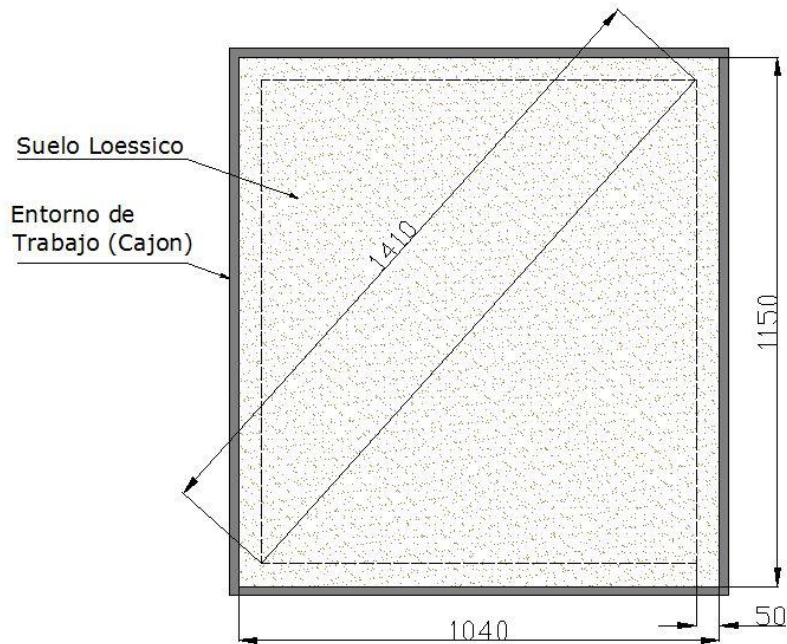


Figura 4.5

Otra opción para salvar esta limitación dimensional podría ser realizar la medición a lo largo de la diagonal del cajón, pero la medición de resistencia de PaT tal como lo indica la norma IEEE Std 81.2, (1991) debe realizarse ubicando los electrodos auxiliares de corriente y de potencial a 90 grados para evitar interferencias entre ellos, por lo que las zonas de medición de alguno de los dos electrodos estarían excesivamente afuera, y entonces también se descarta esta opción.

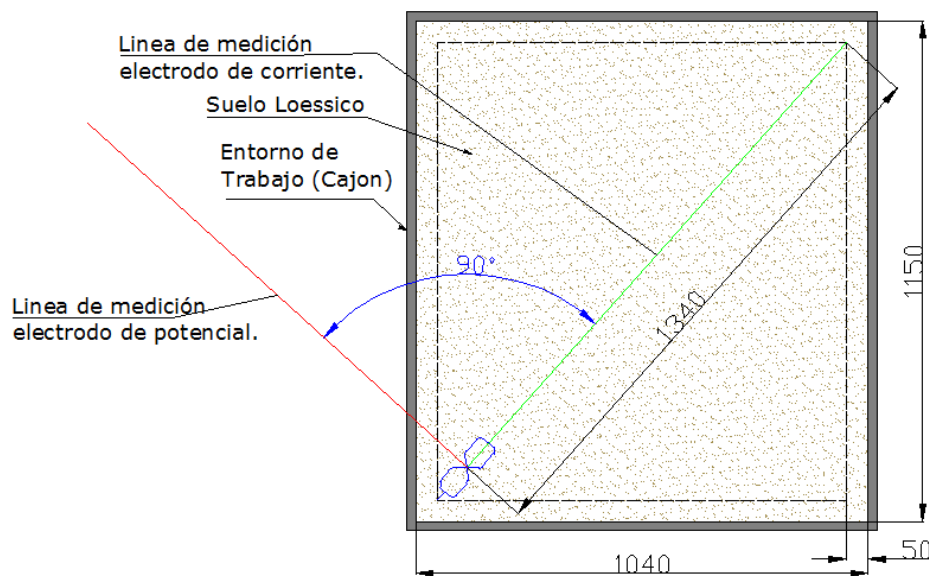


Figura 4.6



Se concluye así que solo se pueden realizar mediciones sobre el modelo a escala del electrodo de SPT de la subestación del tipo monoposte, con lo cual se define realizar estudios sobre ese modelo a escala.

2.4. Ensayo de Humedad.

Se sabe que el contenido de agua o humedad del suelo incide apreciablemente en su resistividad.

El principal efecto del agua es disolver las sales solubles presentes en el terreno. Según García Márquez, (1999) el agua modifica la resistividad del suelo porque las sales disueltas en ella facilitan la conducción eléctrica, no obstante su incidencia es mucho menos acusada al alcanzarse la práctica saturación del terreno, lo que sucede en torno a porcentajes del orden de un 15% en peso.

La humedad de un terreno no suele ser constante y varía con el clima, las épocas del año, la profundidad considerada, la situación del nivel freático y los tipos de suelo.

Sin embargo, dadas las condiciones de estudio bajo las que se encuentra el sistema, se independiza de muchas de estas variables y una vez determinado el porcentaje de humedad al comenzar las mediciones se podrá suponer sin riesgo de cometer errores groseros que esta humedad será uniforme para todo el sistema bajo estudio.

Puede observarse en la curva 2 de la figura 4.7 que la resistividad es inversamente proporcional a la humedad del suelo, hasta alcanzarse la saturación del terreno, debido a que la conducción de la corriente en el suelo es esencialmente electrolítica.

La conducción se realiza a través del agua contenida en los intersticios o poros del suelo que actúa como electrolito por las sales en ella disueltas.

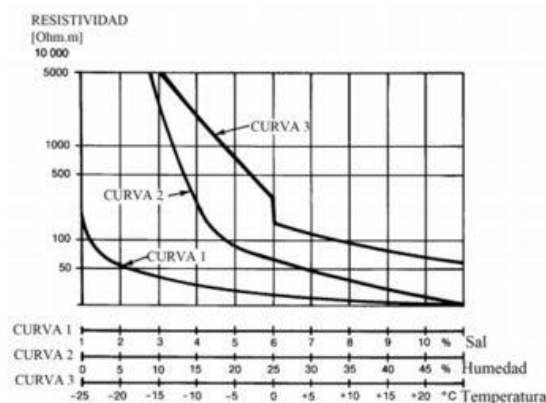


Figura 4.7



Incluso la resistividad del suelo varía con respecto a la humedad para diferentes frecuencias, como se aprecia en la siguiente figura (Moreno, Valencia, Alejandro, Cárdenas, & Villa, 2007).

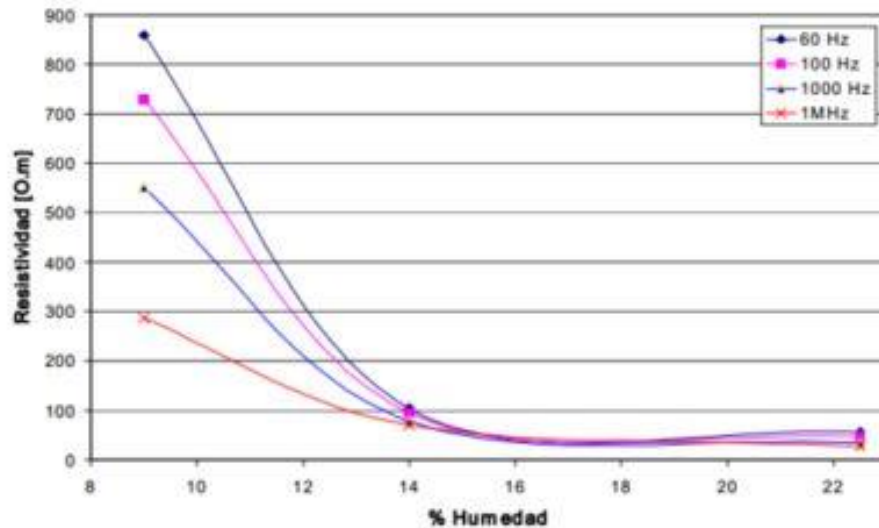


Figura 4.8

Para obtener el porcentaje de humedad del terreno se tomaron tres muestras del mismo, sobre distintos puntos de la superficie de trabajo y a distintas profundidades. Estas muestras fueron colocadas en recipientes de aluminio y pesadas utilizando una balanza, a continuación se detallan las mediciones efectuadas:

- *Instrumento: Balanza Mettler PC 4400*
- *Rango: 5 g - 4400 [g]*
- *Resolución: de 0,01 g hasta 400 [g]*





Muestra nº	Recipiente [g]	Muestra [g]	Neto [g]
1	4,27	235,46	231,19
2	4,28	245,02	240,74
3	4,29	248,45	244,16

Tabla 4.2



Figura 4.9 a



Figura 4.9 b



Figura 4.9 c

Una vez pesadas y rotuladas las muestras fueron llevadas a un horno de temperatura controlada, superior a los $100[^\circ\text{C}]$, donde permanecieron alrededor de 24 horas.



Figura 4.10



Transcurrido este tiempo las muestras fueron pesadas nuevamente arrojando los siguientes resultados.

Muestra n°	Recipiente [g]	Muestra [g]	Neto [g]
1	4,27	215,88	211,61
2	4,28	229,62	225,34
3	4,29	228,86	224,57

Tabla 4.3



Figura 4.11 a



Figura 4.11 b



Figura 4.11 c

A partir de estos datos el porcentaje de humedad de cada una de las muestras se calcula en base al peso perdido por la misma de la siguiente manera:

$$H_{\%} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Los valores de humedad arrojados son:

Muestra n°	$H_{\%}$
1	8,31
2	6,28
3	7,88

Tabla 4.4

Tomando un promedio de las tres muestras el porcentaje de humedad es del 7,5 %.



2.5. Compactación del Suelo Loésico.

El suelo loésico estudiado en primera instancia se encontraba compactado buscando representar las condiciones de obra de un suelo real.

La condición de obra es aquella de máxima compactación del suelo, donde se obtiene la máxima densidad seca del suelo con su contenido óptimo de humedad.

Se supondrá que en el inicio la compactación es homogénea, con una energía de compactación constante a lo largo de todo el cajón. Talocchino-Lozano, (2015) determinaron en el trabajo precedente ésta energía de compactación por unidad de volumen "E", que resulta ser de $6,06 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ y se calcula con la siguiente fórmula, según el ensayo de compactación dado por la ASTM:

$$E = \frac{n * N * P * H}{V}$$

Dónde:

n: es el número de golpes a efectuar por el pisón por cada capa de suelo;

N: es el número de capas de suelo;

P: es el peso del pisón, en [Kg];

H: es la altura de caída del pisón, en [cm];

V: es el volumen del cajón impermeable, en [cm³];

Sin embargo para introducir las heterogeneidades localizadas se realizaron excavaciones sobre el entorno de trabajo que luego fueron nuevamente tapadas con la misma tierra extraída.

Esta acción provocó alteraciones localizadas sobre el grado de compactación del terreno, perdiendo la uniformidad del mismo, no obstante debido a que el volumen de tierra removido para introducir los objetos ya mencionados es despreciable respecto al volumen de tierra cuya compactación no se alteró, se estima que la compactación del suelo loésico no se vio afectada más allá de niveles tolerables.

El grado de compactación reinante dentro del entorno de trabajo fue obtenido por Talocchino-Lozano, (2015) haciendo uso de un pisón y luego por medio del ensayo del cono de arena se constató que dicha compactación resultó ser del 91,51 % referida a la máxima posible, dada por el ensayo Proctor de compactación (que se asume como condición de obra), a una humedad del 14,68%.



Sin embargo debido al paso del tiempo, el terreno estudiado perdió parte de su humedad, como pudo determinarse a través del ensayo de humedad en el punto 2.4 del presente capítulo, siendo ahora el porcentaje de humedad de 7,5%.

Como puede verse en la figura 4.12, correspondiente al ensayo Proctor, al disminuir la humedad, el grado de compactación también disminuye y por ende el valor final de resistividad del terreno aumenta.

Por lo que es de esperarse que el de resistividad obtenido sea un tanto mayor que el obtenido en el instante en que fue medido por primera vez por la fuente citada.

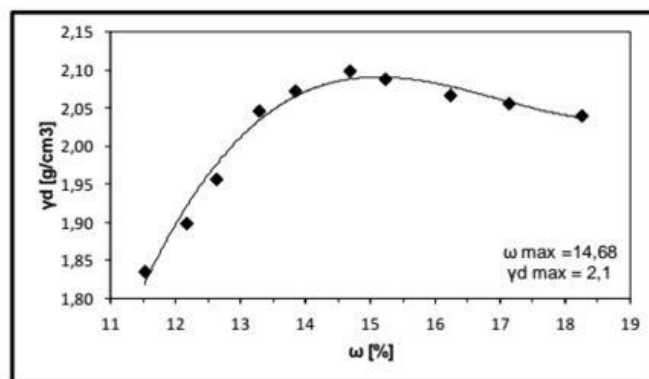


Figura 4.12: Curva de compactación del suelo loésico: Densidad seca en función de la humedad de la compactación.

2.6. Medición de Resistividad.

El método de medición utilizado para medir la resistividad del suelo en el entorno de trabajo es el denominado “método de Wenner Alpha” (véase inciso 1.4.2.3). Como se sabe, este método consta de un arreglo tetraelectródico lineal.

Una vez introducidas los elementos descriptos en 2.2.1 en el entorno de trabajo se realiza una tomografía geoelectrica del terreno a través de una **calicata eléctrica** para realizar un mapeo de su resistividad siguiendo el método de ensayo propuesto por Talocchino-Lozano, (2015).

La tomografía geoelectrica es una imagen que se puede realizar en dos o en tres dimensiones, de la distribución de impedancia o resistividad del subsuelo. Para lograr esta imagen se debe medir la resistividad eléctrica del subsuelo. Los métodos normalmente utilizados para lograrlo consisten en la inyección de una 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 (Gasulla M., 1999).

Se pretende entonces obtener imágenes de la distribución de la resistividad en el subsuelo del entorno de trabajo a partir de mediciones realizadas desde la superficie.

2.6.1. Método de Medición: Calicata Eléctrica.

La calicata eléctrica se realiza haciendo uso del método de medición de resistividad de Wenner Alpha.

La finalidad de la calicata eléctrica (CE) es obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijada una profundidad de investigación. Orellana (1982) resalta que la zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos (Gasulla M., 1999).

La calicata eléctrica utilizada en el presente trabajo es la llamada “calicata Wenner” que consiste en desplazar a la vez los cuatro electrodos C1, P1, P2 y C2 de la figura 1.8, manteniendo sus separaciones interelectródicas a lo largo de un recorrido. De esta forma se obtiene un perfil de resistividades para una determinada profundidad de investigación. Al finalizar el recorrido, se utiliza una mayor separación interelectródica y se realizan mediciones sobre el mismo recorrido para obtener perfiles de resistividades a mayor profundidad.

La puesta en práctica de este método de medición en el entorno de trabajo se describe a continuación.



2.6.2. Aplicación Práctica de la Calicata Eléctrica.

Para la aplicación de este método se divide el cajón impermeable en cinco recorridos electródicos lineales separados 20 cm entre sí (véase figura 4.13). En cada uno de los recorridos se ubican 20 electrodos igualmente espaciados a una distancia de 5 cm.



Figura 4.13. Cajón impermeable con electrodos de medición para método de calicata.

En primera instancia, se toman los cuatro primeros electrodos del primer recorrido y se aplica el método de medición de resistividad de Wenner Alpha.

A los electrodos exteriores denominados C1 y C2 se les inyecta una corriente a través de un transformador VARIAC que se registra con un multímetro, asimismo se registra también la tensión obtenida entre los electrodos interiores denominados P1 y P2 con otro multímetro.

Una vez obtenidos estos los valores, se realizan nuevamente las mismas mediciones, pero desplazándose sobre la trayectoria de medición un electrodo hacia la derecha, es decir 5 [cm].

Este procedimiento se repite hasta finalizar el recorrido.



Se calcula un valor de resistividad aparente por cada desplazamiento eléctrico realizado.

Los valores medidos corresponden a una profundidad que depende de la separación de los electrodos inyectoros.

Para lograr mediciones correspondientes a profundidades mayores, se vuelven a realizar todas las mediciones pero con una separación mayor entre electrodos y se repite el procedimiento ya descripto.

Se toman mediciones para separaciones entre electrodos de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 cm.

Una vez que se obtiene un perfil de resistividades aparentes para el primer recorrido, se vuelve a repetir el proceso para los cuatro recorridos restantes del cajón impermeable, obteniéndose así cinco perfiles distintos de resistividades del suelo.

Como se explicó anteriormente en el capítulo 1 en el inciso 1.3.3.2 el valor de resistividad obtenido a través del método Wenner Alpha está dado por la siguiente expresión:

$$\rho = 2\pi a[m] \frac{U[V]}{I[A]} \equiv [\Omega \cdot m]$$

Como puede observarse dicho valor de resistividad depende de un factor “a” que representa la distancia interelectrodica tomada para la medición.

Sin embargo como las mediciones se realizan sobre modelos a escala 1:20, este factor “a” debe ser escalado para luego introducirlo en la ecuación y obtener valores de resistividad reales.

Todas las mediciones realizadas se exponen en el “Medición calicata” C del presente trabajo.

Los resultados obtenidos se detallan a continuación.



2.6.3. Interpretación de las Mediciones Obtenidas.

Los datos obtenidos en las mediciones de resistividad, tratados de la manera adecuada y haciendo uso de herramientas computacionales, proporcionan una imagen o cartografía de la resistividad real del suelo.

Haciendo uso de un software con la capacidad de crear modelos tridimensionales a partir de los datos puntuales obtenidos, se consigue crear una representación tridimensional de *isosuperficies o isovalores*.

Por ejemplo, en la figura 4.14, se muestra la superficie que se tiene dentro del entorno de trabajo que presenta una resistividad de $33,17 [\Omega.m]$ (isovalor).

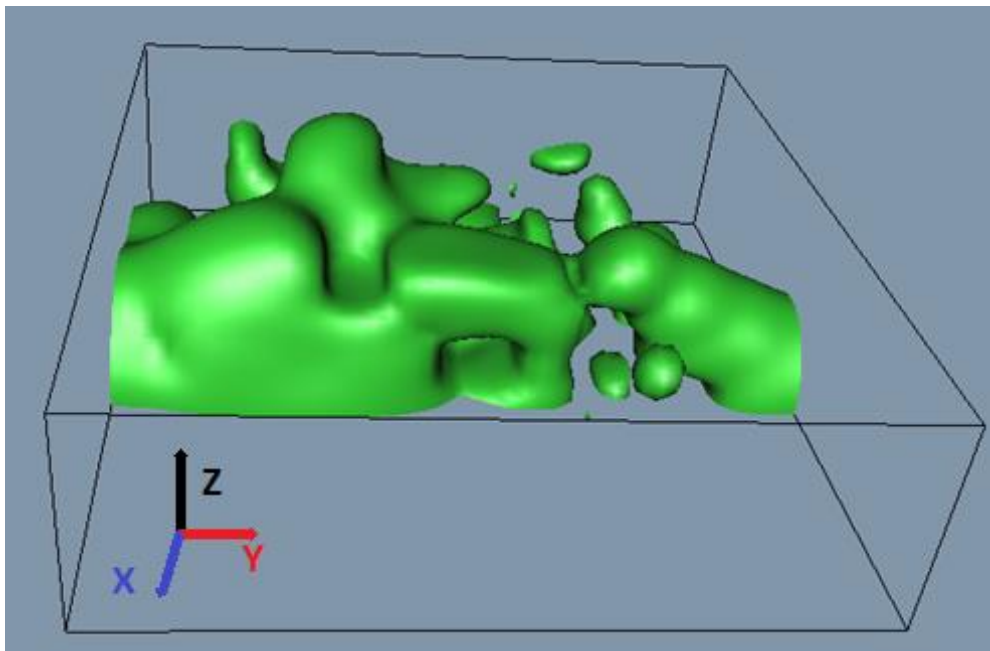


Figura 4.14

De la misma manera se puede obtener la distribución de la resistividad del entorno de trabajo a medida que se varían los isovalores, lo que permite conocer si existen variaciones locales importantes en la resistividad del suelo provocadas por los objetos extraños introducidos, efectos de contorno, distorsiones en el nivel de compactación, etc.

Variando los isovalores, que representan a la resistividad del suelo " ρ ", entre 31 y $42 [\Omega.m]$, se logra representar casi la totalidad del suelo medido, pues aproximadamente el 91% del volumen total del entorno de trabajo presenta una resistividad comprendida entre dichos valores



Tomando instantáneas para las diversas superficies de resistividad registradas, se obtienen las siguientes gráficas que representan la distribución volumétrica de la resistividad dentro del cajón impermeable (véase figura 4.15 – a, b, c, d, e, f, g, h, i).

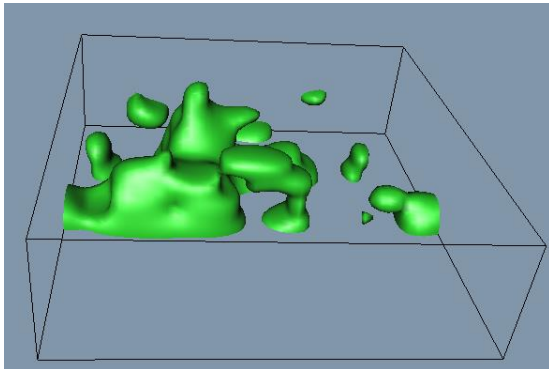


Figura 4.15 a 31,4 [$\Omega.m$],

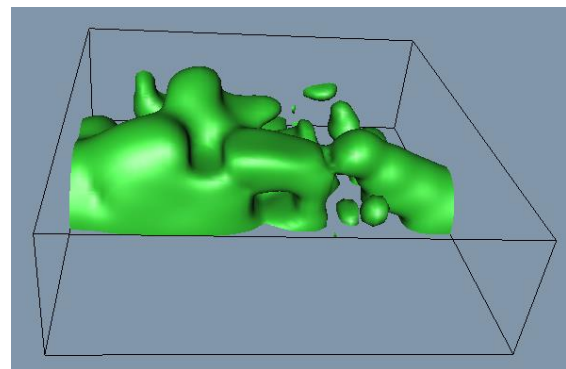


Figura 4.15 b 33,17 [$\Omega.m$],

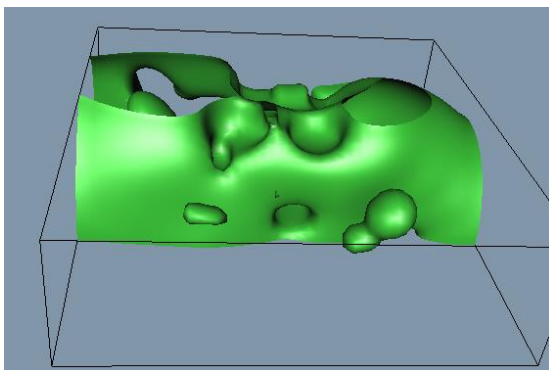


Figura 4.15 c 35,37 [$\Omega.m$],

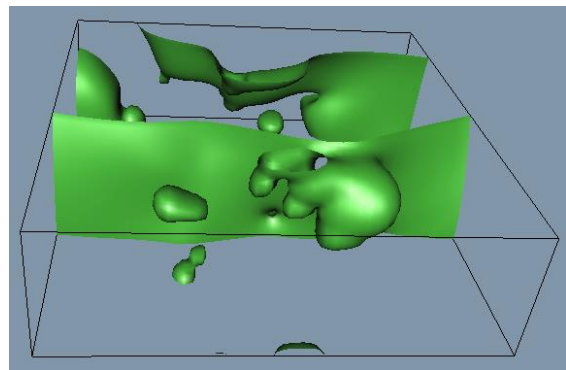


Figura 4.15 d 37,58 [$\Omega.m$],

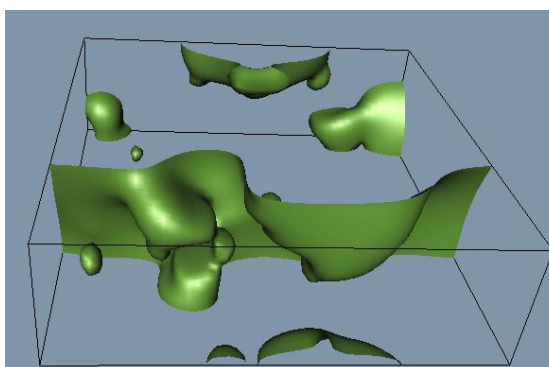


Figura 4.17 e 40,23 [$\Omega.m$],

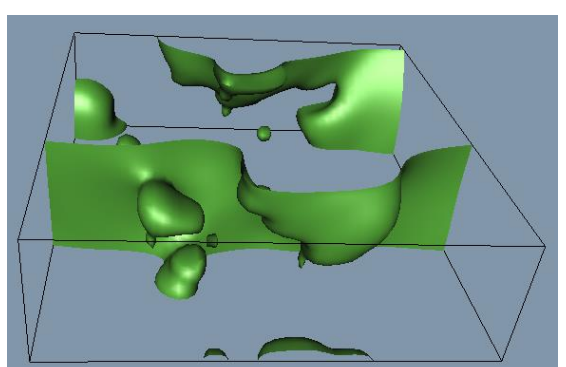


Figura 4.17 f 42,88 [$\Omega.m$],

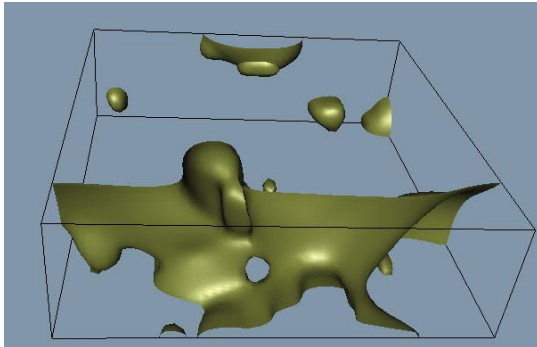


Figura 4.15 g 45,08 [$\Omega.m$],

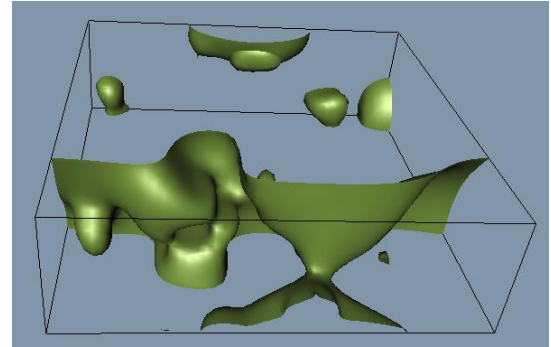


Figura 4.15 h 47,29 [$\Omega.m$],

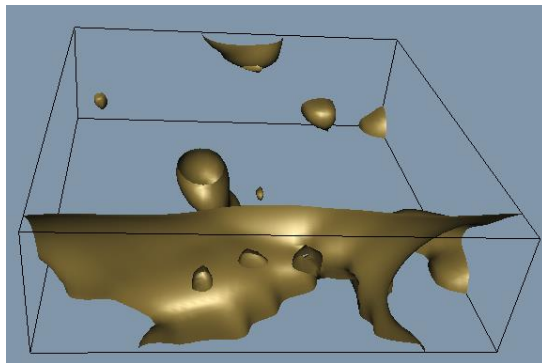


Figura 4.15 i 49,94 [$\Omega.m$],

Los valores ρ_a y ρ_b son los valores promedio de la resistividad del cajón, escalados y no escalados respectivamente.

$$\rho_a = 40,679 [\Omega.m].$$

$$\rho_b = 813,589 [\Omega.m].$$



3. Conclusiones.

3.1. Resistividad.

Con la tomografía geoelectrica generada a partir de la calicata, se puede observar que la resistividad medida es variable para todo el entorno de trabajo, y que presenta valores más elevados en las inmediaciones de las paredes, donde el grado de compactación es menor, y en algunos otros puntos aislados también de alta resistividad.

Sin embargo se puede concluir que el entorno de trabajo no ha variado mucho su distribución de resistividades, solo ha aumentado su resistividad promedio, y esto se debe principalmente a la disminución del contenido de humedad del terreno bajo estudio.

Como se dijo en 2.6.2 la resistividad del suelo loessico estudiado puede expresarse en valores escalados o no escalados y los mismos son:

$$\rho_a = 40,679 [\Omega.m]. \text{ (valor escalado)}$$

$$\rho_b = 813,589 [\Omega.m]. \text{ (valor no escalado)}$$



CAPITULO 5:





1. Estudio de los Sistemas de Puesta a Tierra.

Luego de haber estudiado en el capítulo anterior las características del entorno de trabajo y principalmente su resistividad, nos proponemos ahora, siguiendo los lineamientos dados por las normas IEEE Std 80, (2000) y Std 81.2, (1991), realizar mediciones de resistencia de puesta a tierra sobre los modelos a escala de los SPT bajo estudio.

Se buscara en este capítulo:

- 1) Construir modelos a escala de los SPT dados por el TC1206 para su posterior medición.
- 2) Con distintas normativas y teorías, realizar cálculos teóricos para comparar los resultados con las mediciones realizadas.
- 3) Hacer mención del comportamiento de estos sistemas de puesta a tierra una vez analizados los parámetros de incumbencia.

2. TC1206.

El tipo constructivo denominado **TC1206**, es utilizado tanto por la empresa **EPEC** como por otras empresas distribuidoras de energía del país (EC SAPEM de Catamarca y Enersa de Entre Ríos) y especifica las características constructivas de los sistemas de puesta a tierra a utilizar en las subestaciones aéreas monoposte y biposte.

En el presente capítulo se intenta encontrar el modelo de cálculo teórico que represente más fidedignamente su comportamiento, y comparar los resultados teóricos obtenidos contra las mediciones efectuadas a un modelo a escala que se realiza siguiendo un método de ensayo ya verificado por Talocchino-Lozano,(2005).

3. Modelo a Escala.

3.1. Modelos a Escala del TC1206.

El TC1206 define dos tipos constructivos, uno para las subestaciones aéreas monoposte y otro para las subestaciones aéreas biposte.

Los electrodos utilizados se componen principalmente de un lazo de conductor de cobre desnudo que suele hacerse en obra alrededor del bloque de fundación del poste o de los postes utilizados.



Por lo tanto la longitud resultante de dicho lazo y las medidas de la cuadrícula que este forma, variaran según el caso junto con las fundaciones, los postes y el terreno.

En este sentido cabe aclarar que el TC1206 solo especifica dimensiones mínimas para la cuadrícula del electrodo, esto responde al hecho de que en caso de resultar electrodos de mayor longitud estaremos dimensionando la instalación del lado de la seguridad.

Para ser más claros sobre esto último analizamos la siguiente expresión:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$R = \rho \frac{l}{l^2}$$

$$R = \rho \frac{1}{l}$$

De esta manera se ve claramente la dependencia de la resistencia de puesta a tierra del SPT según la variación de longitud del conductor que lo conforma.

A causa de las limitaciones dimensionales que nos impone el entorno de trabajo explicadas en el punto 2.3 del capítulo 4, carece de sentido construir el electrodo de SPT correspondiente al tipo constructivo utilizado en las subestaciones biposte, ya que el mismo no podría ser medido siguiendo las indicaciones dadas por Carvajal, (2005) y por la IEEE Std 80, (2000) y Std. 81.2, (1991) necesarias para evitar solapamientos y falsas lecturas.

Es por esto que solo se construye el modelo a escala del SPT correspondiente al tipo constructivo utilizado para las subestaciones monoposte.

No obstante y según lo aportado por los estudios de Carvajal, (2005) los resultados obtenidos para el electrodo usado en la subestaciones aéreas monoposte podrán luego extrapolarse para el caso del electrodo usado en las subestaciones aéreas biposte, como se verá en detalle más adelante.

3.2. Elección de la Escala.

La escala 1:20 es propuesta por la norma IEEE Std. 80, (2000) para evitar dificultades en la fabricación de los modelos y para poder llevar a cabo mediciones de calidad sin la necesidad de contar con entornos de trabajo demasiado grandes.



Además, como el método de ensayo verificado por Talocchino-Lozano, (2005), utiliza este factor de escala, se decide hacer uso del mismo también para el presente trabajo integrador que sigue los lineamientos de dicho método de ensayo.

3.3. Dimensiones Reales y Escaladas.

En la figura 5.1 se expresan las dimensiones de los electrodos definidos por el TC1206 de la EPEC ya escalados, utilizando el factor de escala propuesto en el punto anterior.

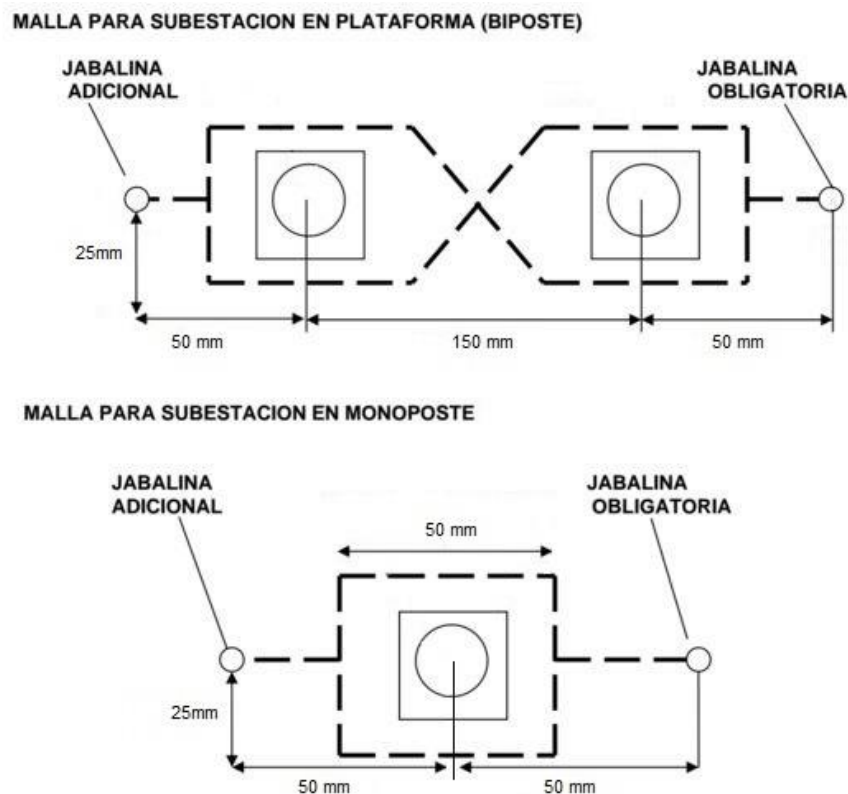


Figura 5.1

3.4. Construcción del Modelo a Escala.

3.4.1. Conductor de la Malla del SPT.

El TC1206 indica que: "La malla estará constituida por alambres de cobre de 3,5 [mm] de diámetro mínimo y en un numero tal que la sección no sea inferior a 25 [mm²], o por cable de cobre de 3 o 7 alambres con 25 [mm²] de sección mínima."



Un conductor equivalente al descrito pero escalado 1:20 resulta ser de 1,25 [mm²] de sección mínima.

Por lo tanto se necesita de un cable de cobre desnudo de al menos 0,282 [mm] de diámetro mínimo.

Sera un conductor de este tipo el que se utilizara para representar aquel que rodea la fundación del poste y vincula al electrodo del SPT con la subestación y con la jabalina.

El conductor utilizado, como se ve en las figuras 5.2 a y 5.2 b, es de 0,29 [mm] de diámetro, mayor que los 0,282 [mm] exigidos, por lo tanto cumple las exigencias del TC1206.



Figura 5.2 a



Figura 5.2 b

3.4.2. Jabalina del SPT.

3.4.2.1. Electrodo Real.

El electrodo real a partir de la cual se llevó a cabo el modelo es una Jabalina lisa L-1615, según Norma IRAM 2309-1, (2013), que posee las siguientes características y dimensiones:

- Longitud real de la jabalina [Lr] = 1500 [mm].
- Diámetro real de la jabalina [Dr] = 140 [mm].
- Espesor mínimo de capa de cobre de Jabalina Real (Er) ≥ 254 [μm].

3.4.2.2. Electrodo Modelo.



- Longitud de la jabalina modelo [Lm] = 75 [mm].
- Diámetro de la jabalina modelo [Dm] = 0,7 [mm].
- Espesor mínimo de capa de cobre de Jabalina modelo (Em) ≥ 12, 7 [μm].

3.4.2.3. Elaboración del Modelo.

Alma de Acero: Para representar el alma de la jabalina, se emplea una varilla de acero en forma de hebra con terminación en punta y de diámetro externo igual a:

$$Dma = 0,45 [mm]$$

Capa de Cobre: Considerando el alma de la jabalina como una varilla de acero en forma cilíndrica, el espesor de la capa de cobre necesaria para recubrir la misma, será:

$$Ecu = \frac{Dm - Dma}{2} = \frac{0,70 [mm] - 0,45 [mm]}{2} = 0,125 [mm]$$

Vemos que este valor supera ampliamente el valor impuesto por Norma IRAM 2309-1, (2013), que es de 0,0127 mm como mínimo, como se indicó anteriormente.

Así mismo, para determinar la cantidad de material a depositar sobre el alma de acero, que se considera como una varilla cilíndrica, se procede al siguiente razonamiento:

$$Vcu = \frac{Lm \pi (Dm^2 - Da^2)}{4}$$

$$Vcu = \frac{75 [mm] \pi (0,7^2 - 0,45^2)[mm^2]}{4} = 16,94 [mm^3]$$

$$\rho_{cu} = 0,0089 [gr/mm^3]$$

$$W = \rho_{cu} * Vcu = 0,0089 [gr/mm^3] * 16,94 [mm^3] = 0,151 gr$$

Dónde:

Vcu: es el volumen aproximado de la capa de cobre a depositar, en [mm³];

ρ_{cu}: es la densidad del cobre, en [gr/mm³];

W: es la cantidad aproximada de la capa de cobre a depositar, en [gr];

Unión cobre-acero: Con el objeto de obtener una capa de cobre de espesor controlado, buena terminación y una perfecta unión cobre-acero, que sea resistente a la



corrosión electroquímica y de excelente conductividad eléctrica, se aplica sobre el alma de acero un proceso de electrodeposición de cobre, cuyo principio que rige este fenómeno es la electrólisis.

El proceso de electrólisis (o electrolítico), consiste en hacer pasar una corriente eléctrica continua a través de un electrolito (sustancia iónica acuosa), entre dos electrodos conductores denominados ánodo y cátodo. El proceso utiliza a la corriente eléctrica para reducir los cationes (metálicos), contenidos en la solución electrolítica que se precipitan ó se depositan sobre la superficie del cátodo creando un recubrimiento. El cátodo, estará conectado al terminal negativo, mientras que el ánodo, conectado al terminal positivo, estará compuesto de dicho material de recubrimiento para ir aportando iones a la solución a medida que se oxida, sustituyendo a los que se están consumiendo en la reacción electroquímica.

La ley de Faraday constituye el principio fundamental de la electrólisis. Con la ecuación de esta ley, se puede determinar el tiempo que requiere el proceso, en donde la cantidad de metal se corroe o se deposita uniformemente sobre otro, y que se expresa de la siguiente manera:

$$t = \frac{W \cdot n \cdot F}{I \cdot M}$$

Dónde:

t: es el tiempo que dura el proceso, en [s];

n: es el número de valencia del metal depositado;

F: es la constante de Faraday igual a 96.500 [A·s/mol].

I: es la corriente eléctrica continua circundante, en [A];

M: es la masa atómica del metal depositado, en [gr/mol];

De este modo, se logra recubrir con una capa de cobre a la varilla de acero representativa del alma de la jabalina, tal como se observa en la siguiente figura 5.3.

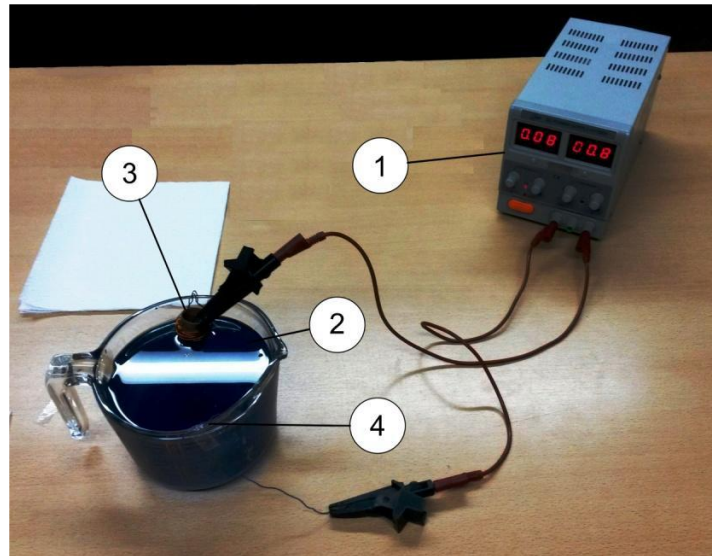


Figura 5.3

Referencias:

- 1- Fuente de corriente eléctrica continua;
- 2- Solución electrolítica, proporción de sulfato de cobre y agua destilada;
- 3- Electrodo anódico, caño de cobre recocido, con una pureza del 98%;
- 4- Electrodo catódico, varilla de acero.

Así mismo, se definen los siguientes valores que intervienen en dicho proceso de electrodeposición:

El número de valencia de la sustancia como ion en la solución es:

$$n = 2;$$

(Cantidad de electrones por mol: $\text{Cu}^{2+} + 2e^{-} \rightarrow \text{Cu}$)

De tabla periódica de elementos *obtenemos*:

$$M = 63,5 \text{ [gr/mol]};$$

Los resultados del proceso de electrodeposición, en cuanto a la obtención de una capa uniforme y resistente, dependen de varios factores; entre ellos el valor de corriente continua que se hace circular por el proceso. Mientras más lento sea el proceso, mejor serán los resultados obtenidos, es de ahí el motivo por el cual se selecciona este valor de corriente:

$$I = 0,08 \text{ [A]}$$



Por lo tanto, el tiempo de duración aproximado a tener en cuenta para la deposición de cobre sobre el alma de acero de la jabalina modelo, por medio del método de electrodeposición, será:

$$t = \frac{0,151 \text{ [gr]} \cdot 2 \cdot 96.500 \text{ [A} \cdot \text{mol/s]}}{0,08 \text{ [A]} 63,5 \text{ [gr/mol]}} = 5722,1 \text{ s} = 95,4 \text{ min} = 1,59 \text{ h}$$

Previo a la aplicación de este proceso, es recomendable sumergir la varilla de acero, un tiempo prudente, en ácido muriático diluido en agua, (proporción 1 litro de ácido muriático en 20 litros de agua), con el propósito de efectuar sobre la superficie de dicha varilla las siguientes acciones:

- Remover el exceso de adhesivos y manchas de grasa;
- Limpiar las manchas de óxido y sarro;
- Eliminar todo tipo de proceso de recubrimiento previo, etc.

Se muestran en las siguientes figuras 5.4 a y 5.4 b las dimensiones finales del electrodo tipo jabalina:



Figura 5.4 a



Figura 5.4 b

3.4.3. Conexión/Unión del Conductor con la Jabalina Modelo.

Para asegurar un buen contacto eléctrico, favoreciendo la conducción, y una gran resistencia mecánica, la unión entre la jabalina y la malla se realizara por medio de una soldadura blanda de una aleación que contiene 60% de estaño y 40% de plomo de baja temperatura de fusión. Al ejecutar dicha soldadura, se deben tomar algunas precauciones:

- Deberá ser lo más pequeña posible como para representar una escala acorde a la realidad e impedir que se fragilice produciendo su posterior fisura o ruptura.
- Debe ser lo más uniforme y lisa posible como para evitar gradientes de potenciales extras.

3.5. SPT modelo.

Respetando las dimensiones que se pueden apreciar en la figura... y utilizando todos los elementos descritos en los puntos anteriores, se construyó el modelo a escala del SPT utilizado en las subestaciones transformadoras aéreas monoposte. La misma se puede apreciar a continuación en la figura 5.5.

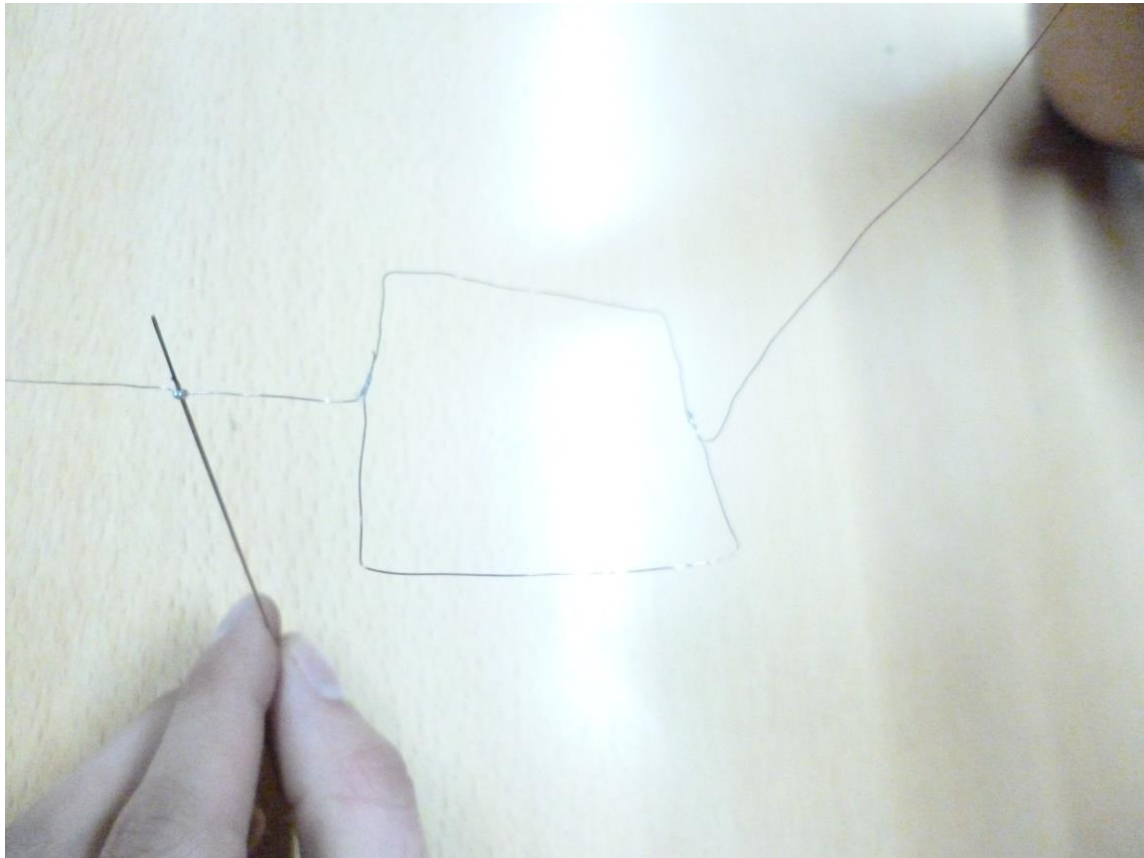


Figura 5.5

4. Teorías de Cálculo de Modelos de SPT.

A partir de diversas teorías de cálculo se pretenden encontrar estimaciones teóricas del valor resistencia de puesta a tierra del SPT bajo estudio.

Principalmente nos basamos en la norma IEEE Std. 80, (2000) que propone en términos generales para sistemas de malla y jabalina calcular por separado la resistencia de puesta a tierra de cada electrodo y luego utilizar las ecuaciones de Schwarz para calcular el valor compuesto.

Dicha normativa nos da fórmulas para el cálculo de resistencia de ambos electrodos. En el presente trabajo integrador se buscarán también otras alternativas de cálculo, basadas en distintas teorías de cálculo para jabalinas y mallas, para luego utilizarlas en la ecuación de Schwarz.



4.1. Cálculo de Resistencia de Puesta a Tierra del Electrodo Tipo Jabalina.

Para el cálculo de resistencia de puesta a tierra de la jabalina, se utilizarán distintas teorías de cálculo provenientes de distintos autores y de distintas normativas. Además se utilizarán tanto los valores escalados como los no escalados de las dimensiones del SPT y de la resistividad para verificar si los resultados son coincidentes.

Para los cálculos posteriores se utilizan los siguientes datos:

$L_m = \text{longitud de la jabalina modelo} = 0,075 \text{ [m]}$.

$D_m = \text{Diámetro de la jabalina modelo} = 0,0007 \text{ [m]}$

$\rho_a = \text{Resistividad promedio del suelo escalado} = 40,679 \text{ [\Omega.m]}$

$L_r = \text{longitud de la jabalina real} = 1,5 \text{ [m]}$.

$D_r = \text{Diámetro de la jabalina modelo} = 0,014 \text{ [m]}$

$\rho_r = \text{Resistividad promedio del suelo sin escalar} = 813,589 \text{ [\Omega.m]}$

4.1.1. Método Cilindro-Esfera.

Según la norma IRAM 2281-1, (1996), se puede expresar que:

$$R_{cem} = \frac{\rho_a}{2\pi L_m} \ln \left(\frac{2L_m}{D_m} \right) = \frac{40,679 \text{ [\Omega.m]}}{2\pi \cdot 0,075 \text{ [m]}} \ln \left(\frac{2 * 0,075 \text{ [m]}}{0,0007 \text{ [m]}} \right) = 463,33 \text{ [\Omega]}$$

$$R_{cer} = \frac{\rho_r}{2\pi L_r} \ln \left(\frac{2L_r}{D_r} \right) = \frac{813,589 \text{ [\Omega.m]}}{2\pi \cdot 1,5 \text{ [m]}} \ln \left(\frac{2 * 1,5 \text{ [m]}}{0,014 \text{ [m]}} \right) = 463,33 \text{ [\Omega]}$$

Donde R_{cem} y R_{cer} son las resistencias de las jabalinas del modelo y del electrodo real respectivamente utilizando el método cilindro esfera.

4.1.2. Hipótesis de Elipse.

Según la norma IRAM 2281-1, (1996), y utilizada tanto en la cátedra de Instalaciones Electromecánica de la F.C.E.F.yN. de la UNC, y para el cálculo presentado ante la EPEC, se puede expresar que:



$$R_{hem} = \frac{\rho a}{2\pi Lm} \operatorname{Ln} \left(\frac{4Lm}{Dm} \right) = \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{2\pi 0,075 [m]} \operatorname{Ln} \left(\frac{4 * 0,075 [m]}{0,0007 [m]} \right) = 523,16 [\Omega]$$

$$R_{her} = \frac{\rho b}{2\pi Lr} \operatorname{Ln} \left(\frac{4Lr}{Dr} \right) = \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{2\pi 1,5 [m]} \operatorname{Ln} \left(\frac{4 * 1,5 [m]}{0,014 [m]} \right) = 523,16 [\Omega]$$

Donde R_{hem} y R_{her} son las resistencias de las jabalinas modelo y del electrodo real respectivamente utilizando la hipótesis de la elipse.

4.1.3. Hipótesis de Corriente a lo Largo de un Electrodo.

Según la norma IRAM 2281-1, (1996), se puede expresar que:

$$R_{hcm} = \frac{\rho a}{2\pi Lm} \operatorname{Ln} \left(\frac{8Lm}{Dm} - 1 \right) = \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{2\pi 0,075 [m]} \operatorname{Ln} \left(\frac{8 * 0,075 [m]}{0,0007 [m]} - 1 \right) = 582,90 [\Omega]$$

$$R_{hcr} = \frac{\rho b}{2\pi Lr} \operatorname{Ln} \left(\frac{8Lr}{Dr} - 1 \right) = \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{2\pi 1,5 [m]} \operatorname{Ln} \left(\frac{8 * 1,5 [m]}{0,014 [m]} - 1 \right) = 582,90 [\Omega]$$

Donde R_{hcm} y R_{hcr} son las resistencias de las jabalinas modelo y del electrodo real respectivamente utilizando la hipótesis de corriente a lo largo de un electrodo.

4.1.4. Expresión según AEA 90364-7-771, (2006).

Según AEA 90364-7-771, (2006), se puede expresar que:

$$R_{aeam} = \frac{\rho a}{2\pi Lm} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{8Lm}{Dm} \right) - 1 \right] = \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{2\pi 0,075 [m]} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{8 * 0,075 [m]}{0,0007 [m]} \right) - 1 \right]$$

$$R_{aeam} = 496,68 [\Omega]$$

$$R_{aear} = \frac{\rho b}{2\pi Lr} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{8Lr}{Dr} \right) - 1 \right] = \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{2\pi 1,5 [m]} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{8 * 1,5 [m]}{0,014 [m]} \right) - 1 \right]$$

$$R_{aear} = 496,68 [\Omega]$$

Donde R_{aeam} y R_{aear} son las resistencias de las jabalinas modelo y del electrodo real respectivamente utilizando la expresión de AEA 90364-7-771, (2006).



4.1.5. Expresión según Ing. Juan Carlos Arcioni, (2002).

Se puede expresar que:

$$R_{cam} = \frac{\rho a}{2\pi Lm} \ln \left(\frac{2Lm}{Dm} + 1 \right) = \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{2\pi \cdot 0,075 [m]} \ln \left(\frac{2 * 0,075 [m]}{0,0007 [m]} + 1 \right) = 463,73 [\Omega]$$

$$R_{car} = \frac{\rho b}{2\pi Lr} \ln \left(\frac{2Lr}{Dr} + 1 \right) = \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{2\pi \cdot 1,5 [m]} \ln \left(\frac{2 * 1,5 [m]}{0,014 [m]} + 1 \right) = 463,73 [\Omega]$$

Donde R_{cam} y R_{car} son las resistencias de las jabalinas modelo y del electrodo real respectivamente utilizando la Expresión del Ing. Juan Carlos Arcioni, (2002).

4.1.6. Según Método de Norma IEEE Std. 80 (2000).

Se puede expresar según dicha la normativa de IEEE que:

$$\begin{aligned} R_{eem} &= \frac{\rho a}{2\pi n Lm} \left[\ln \left(\frac{8Lm}{Dm} \right) - 1 + \frac{2 k1 Lm}{\sqrt{Am}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] = \\ &= \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{2\pi * 1 * 0,075 [m]} \left[\ln \left(\frac{8 * 0,075 [m]}{0,0007 [m]} \right) - 1 + \frac{2 * 1,08 * 0,075 [m]}{\sqrt{0,0025 [m^2]}} (\sqrt{1} - 1)^2 \right] = \end{aligned}$$

$$R_{eem} = 496,6873 [\Omega]$$

$$\begin{aligned} R_{eer} &= \frac{\rho b}{2\pi n Lr} \left[\ln \left(\frac{8Lr}{Dr} \right) - 1 + \frac{2 k1 Lr}{\sqrt{Ar}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] = \\ &= \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{2\pi * 1 * 1,5 [m]} \left[\ln \left(\frac{8 * 1,5 [m]}{0,014 [m]} \right) - 1 + \frac{2 * 1,08 * 1,5 [m]}{\sqrt{1 [m^2]}} (\sqrt{1} - 1)^2 \right] = \end{aligned}$$

$$R_{eer} = 496,6873 [\Omega]$$

Dónde:

n = número de jabalinas en el sistema de puesta a tierra.

Am = Área superficial de la malla en el sistema de puesta a tierra modelo.

Ar = Área superficial de la malla en el sistema de puesta a tierra modelo.

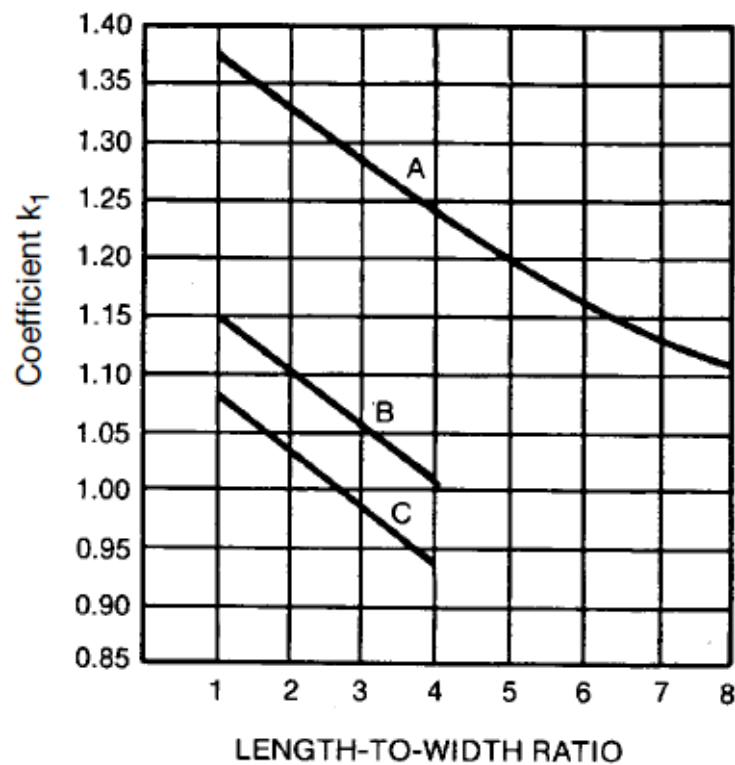


$$A_m = a_m * b_m = 0,05 [m] * 0,05 [m] = 0,0025 [m^2]$$

$$A_r = a_r * b_r = 1 [m] * 01 [m] = 1 [m^2]$$

Siendo a_m y b_m las dimensiones laterales de la malla modelo y, a_r y b_r las dimensiones laterales de la malla real.

Luego K_1 es un coeficiente que se calcula según el siguiente gráfico (figura 5.6) con sus respectivas formulas según IEEE Std. 80, (2000).



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$

$$\gamma_A = -0.04x + 1.41$$

CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_B = -0.05x + 1.20$$

CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_C = -0.05x + 1.13$$

Figura 5.6 Cálculo de coeficiente k_2 IEEE Std. 80, (2000).



Dónde:

$$x = \frac{am}{bm} = \frac{ar}{br} = 1$$

Y utilizando la curva C que es correspondiente a nuestro caso, resulta:

$$kI = 1,08$$

4.1.7. Tabla Resumen RPAT de Jabalinas Según las Distintas Teorías.

En la siguiente tabla se hace un resumen de todos los valores obtenidos en los cálculos precedentes de resistencia de puesta a tierra de jabalina.

Tabla resumen de Resistencia de PaT de electrodo jabalina			
Método Cilindro esfera	Modelo	463,33	Ω
	Real	463,33	Ω
Método Elipse	Modelo	523,16	Ω
	Real	523,16	Ω
Método corriente a lo largo de un electrodo	Modelo	582,90	Ω
	Real	582,90	Ω
Método AEA 90364-7-771, (2006)	Modelo	496,68	Ω
	Real	496,68	Ω
Método Arcioni	Modelo	463,73	Ω
	Real	463,73	Ω
Método IEEE Std. 80-2000	Modelo	496,68	Ω
	Real	496,68	Ω

Tabla 5.1. Resumen de resistencia de PaT de electrodo tipo jabalina.

Como se puede observar si se utilizan todos los valores a escala de manera coherente o todos los valores de sin afectar la escala se llega la mismo resultado.



4.2. Cálculo de Resistencia de Puesta a Tierra del Electrodo Tipo Malla.

Para realizar el cálculo de la malla, se procede con la norma IEEE Std. 80, (2000), la cual nos provee la siguiente fórmula de cálculo:

$$R_m = \frac{\rho a}{\pi L_{cm}} \left[\ln \left(\frac{2L_{cm}}{a'} \right) + \frac{K1 L_{cm}}{\sqrt{Am}} - K2 \right]$$

$$R_r = \frac{\rho b}{\pi L_{cr}} \left[\ln \left(\frac{2L_{cr}}{a'} \right) + \frac{K1 L_{cr}}{\sqrt{Ar}} - K2 \right]$$

Dónde:

R_m = Resistencia de la malla modelo [Ω].

R_r = Resistencia de la malla real [Ω].

L_{cm} = Longitud total del conductor enterrado del modelo [m].

L_{cr} = Longitud total del conductor enterrado real [m].

$am' = \sqrt{a 2hm}$; para un conductor enterrado en [m].

$am' = a$; para conductores en la superficie en [m].

(siendo a el radio del conductor de la malla modelo).

hm = profundidad de enterramiento del SPT modelo [m].

$ar' = \sqrt{a 2hr}$; para un conductor enterrado en [m].

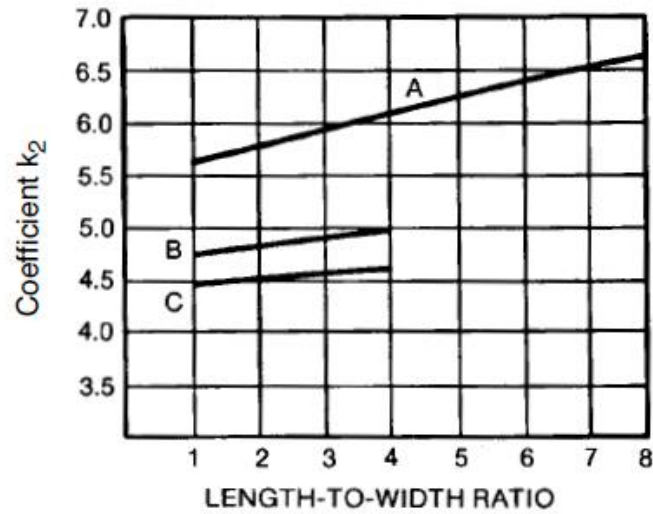
$ar' = a$; para conductores en la superficie, [m].

(siendo a el radio del conductor de la malla real).

hr = profundidad de enterramiento del SPT real [m].

$K1$ = Constante determinada en punto 4.1.6

$K2$: se calcula a partir de la siguiente grafica (figura 5.7) de la siguiente manera:



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$
 $\gamma_A = 0.15x + 5.50$
 CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$
 $\gamma_B = 0.10x + 4.68$
 CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$
 $\gamma_C = -0.05x + 4.40$

Figura 5.7. Cálculo de coeficiente k_2 IEEE Std. 80, (2000).

Dónde:

$$x = \frac{am}{bm} = \frac{ar}{br} = 1$$

Y utilizando la curva C que es correspondiente a nuestro caso, resulta:

$$k_2 = 4,35$$

Luego procedemos a calcular el resto de parámetros para introducirlos en las fórmulas de resistencia de las mallas:

$$am' = \sqrt{0,000145 [m] \cdot 2 \cdot 0,035 [m]} = 0,00319[m]$$

$$ar' = \sqrt{0,0029 [m] \cdot 2 \cdot 0,7 [m]} = 0,0637[m]$$

$$L_{cm} = 2 \cdot am + 2 \cdot bm + 0,025 [m] = 2 \cdot 0,05[m] + 2 \cdot 0,05[m] + 0,025[m] = 0,225 [m]$$



$$Lcr = 2 * ar + 2 * br + 0,5 [m] = 2 * 1[m] + 2 * 1[m] + 0,5[m] = 4,5 [m]$$

Entonces:

$$Rm = \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{\pi 0,225 [m]} \left[\ln \left(\frac{2 * 0,225 [m]}{0,00451[m]} \right) + \frac{1,08 * 0,225 [m]}{\sqrt{0,0025 [m^2]}} - 4,35 \right] = 314,25 \Omega$$

$$Rr = \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{\pi 4,5 [m]} \left[\ln \left(\frac{2 * 4,5 [m]}{0,090[m]} \right) + \frac{1,08 * 4,5 [m]}{\sqrt{1 [m^2]}} - 4,35 \right] = 314,25 \Omega$$

4.3. Calculo de Resistencia Toral del Sistema de Puesta a Tierra.

La normativa IEEE Std. 80, (2000), proporciona la siguiente expresión para realizar el cálculo total de la resistencia de puesta a tierra del sistema, la cual fue desarrollada por Schwarz.

$$R_{sis} = \frac{R1 R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2Rm}$$

Dónde:

$R1 =$ Resistencia de la jabalina.

$R2 =$ Resistencia de la malla.

$Rm =$ resistencia mutua.

La resistencia mutua se calcula como:

$$Rmm = \frac{\rho a}{\pi Lcm} \left[\ln \left(\frac{2Lcm}{lm} \right) + \frac{K1 Lcm}{\sqrt{Am}} - K2 + 1 \right]$$

$$Rmr = \frac{\rho b}{\pi Lcr} \left[\ln \left(\frac{2Lcr}{lr} \right) + \frac{K1 Lcr}{\sqrt{Ar}} - K2 + 1 \right]$$

$Rmm =$ resistencia mutua entre la malla y jabalina modelo $[\Omega]$.

$Rmr =$ resistencia mutua entre la malla y jabalina real $[\Omega]$.



Luego:

$$R_m = \frac{40,679 [\Omega \cdot m]}{\pi \cdot 0,225 [m]} \left[\ln \left(\frac{2 * 0,225 [m]}{0,075 [m]} \right) + \frac{1,08 * 0,225 [m]}{\sqrt{0,0025 [m^2]}} - 4,35 + 1 \right] = 190,015 \Omega$$

$$R_r = \frac{813,589 [\Omega \cdot m]}{\pi \cdot 4,5 [m]} \left[\ln \left(\frac{2 * 4,5 [m]}{1,5 [m]} \right) + \frac{1,08 * 4,5 [m]}{\sqrt{1 [m^2]}} - 4,35 + 1 \right] = 190,015 \Omega$$

Habiendo obtenido diferentes valores resistencia de puesta a tierra de la jabalina, de la malla y mutua, se procede a combinar los datos para calcular el valor de resistencia de puesta a tierra del sistema completo.

Lo que se hace de manera siguiente es combinar los distintos valores obtenidos por distintos autores, y hacer el cálculo de resistencia del sistema de puesta a tierra con la ecuación de Schwarz. Dichos resultados se explicitan en el siguiente cuadro:

Teoría		Resistencia de jabalina	Resistencia de malla	Resistencia mutua	Resistencia Combinada
Método Cilindro esfera	Modelo	463,329	314,250	190,015	275,426
	Real	463,329	314,250	190,015	275,426
Método Elipse	Modelo	523,164	314,250	190,015	280,505
	Real	523,164	314,250	190,015	280,505
Método corriente a lo largo de un electrodo	Modelo	582,899	314,250	190,015	284,403
	Real	582,899	314,250	190,015	284,403
Método AEA 90364-7-771, (2006)	Modelo	496,676	314,250	190,015	278,430
	Real	496,676	314,250	190,015	278,430
Método Arcioni	Modelo	463,731	314,250	190,015	275,465
	Real	463,731	314,250	190,015	275,465
Método IEEE Std. 80-2000	Modelo	496,676	314,250	190,015	278,430
	Real	496,676	314,250	190,015	278,430

Tabla 5.2. Resistencia del SPT con distintas teorías de cálculo.

Como se puede observar todos los cálculos tienen valores similares. Además se puede elegir calcular el valor de resistencia de puesta a tierra por cualquier camino, ya sea con todos los valores escalados o con todos los valores sin escalar.



5. Instalación del Modelo a Escala Dentro del Entorno de Trabajo.

Una vez construido el modelo a escala del electrodo de puesta a tierra, se procede a su instalación dentro del entorno de trabajo ya descrito en capítulos anteriores.

Para elegir la ubicación de dicho modelo dentro del entorno se tendrán en cuenta las distancias recomendadas para efectuar las mediciones posteriores de resistencia de puesta a tierra, tal como se explica en el punto 6 del presente capítulo, y es por esto que la mejor opción para ubicar el modelo resulta ser una de las esquinas del entorno de trabajo.

En cuanto a la profundidad de enterramiento del electrodo se tendrá en cuenta lo indicado por el TC1206: “La malla se encontrara en un plano horizontal situado como mínimo a 500 mm por debajo de la superficie del terreno”.

Llevando esta medida a la escala del modelo se ubica el mismo a una profundidad no menor a 25 mm por debajo de la superficie del terreno.

En las siguientes figuras 5.8 a, 5.8 b y 5.8 c, se esquematiza la posición del electrodo modelo dentro del entorno de trabajo.

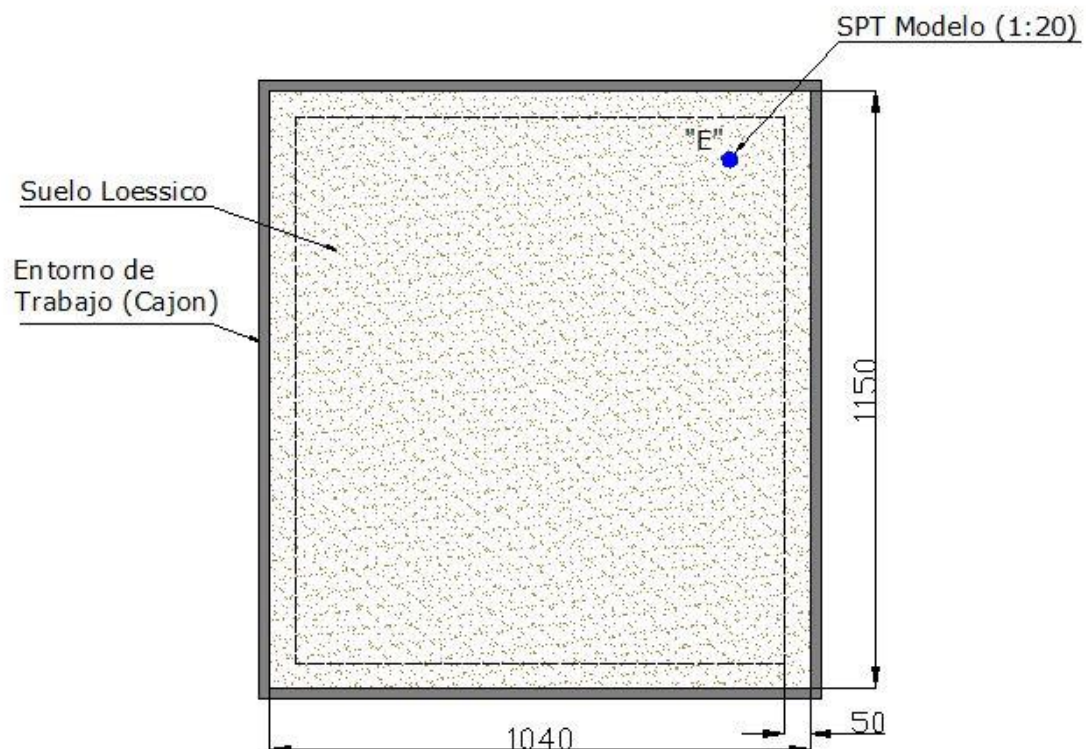


Figura 5.8 a

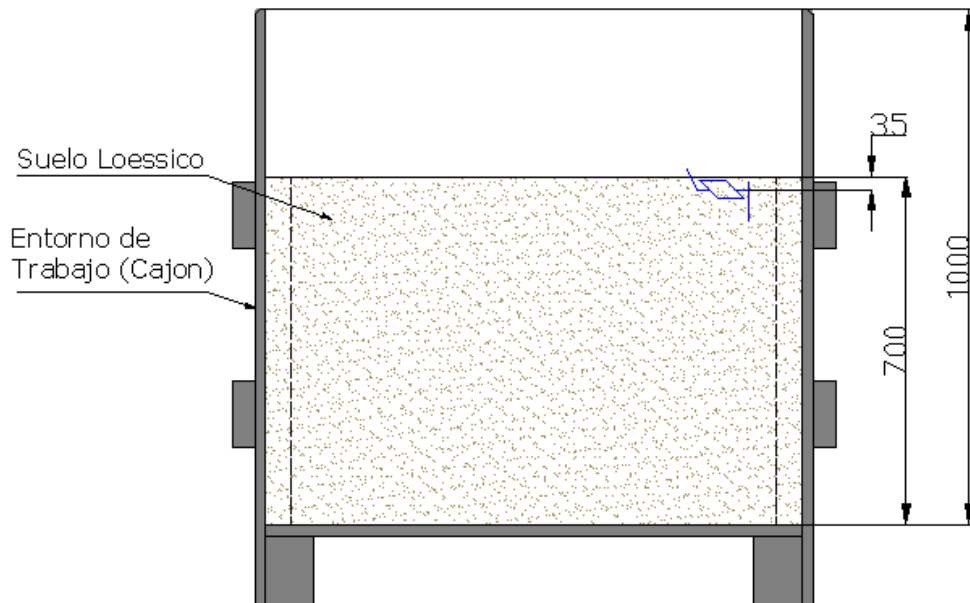


Figura 5.8 b

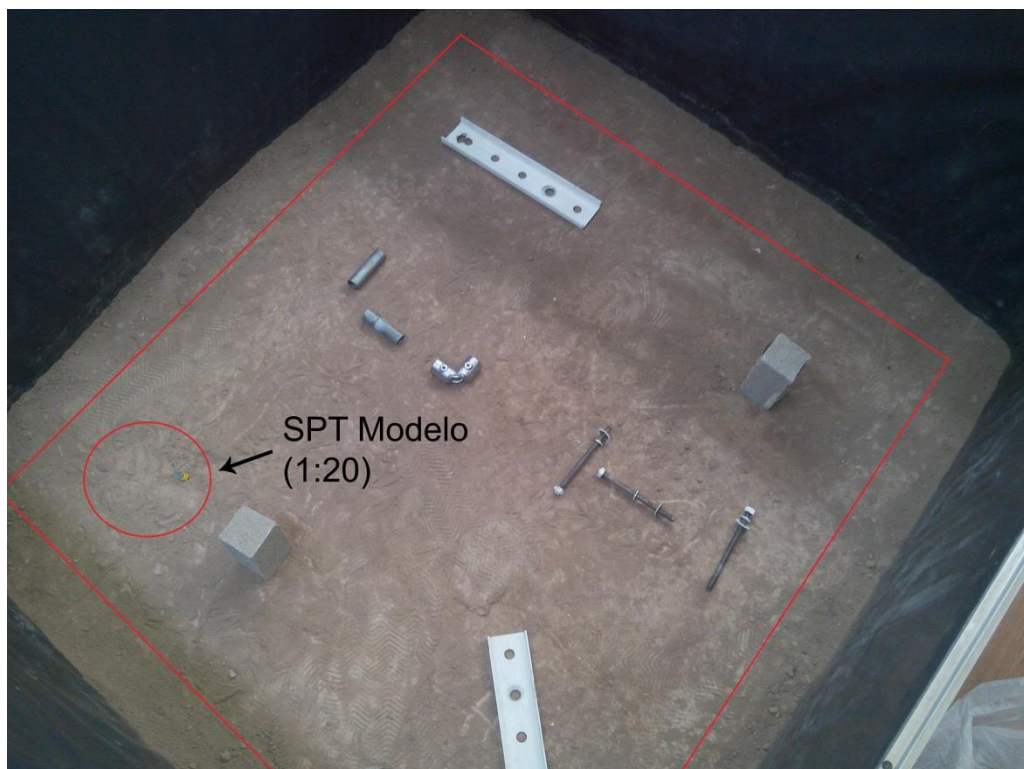


Figura 5.8 c



6. Medición de Resistencia de Puesta a Tierra. Método de la Caída de Potencial.

Las técnicas para medir la resistencia de un SPT, ya explicadas en el capítulo 1 inciso 1.1.3, son variadas y cada una tiene sus ventajas y desventajas.

Sin embargo, la interpretación de los datos registrados puede variar, según las características del terreno donde se hace la medición, el propio SPT medido y algunos otros factores como lo son las interferencias externas que afectan dicha medición.

Entre los diferentes métodos de medición de la resistencia de puesta a tierra ya mencionados se elige el **método de caída de potencial** para efectuar las mediciones sobre el modelo bajo estudio.

Este método se elige por sobre los demás debido a que es el método fundamental para medir la resistencia de grandes sistemas de tierra (véase 8.2.1.5 de IEEE Std. desde 81 hasta 1983 [2]).

La caída de potencial, se ejecuta teniendo en cuenta lo indicado por la norma IEEE Std. 81.2, (1991), para evitar errores de medición causados por el acoplamiento mutuo entre electrodos de corriente "C" y de potencial "P" al medir con corriente alterna (AC).

El acoplamiento mutuo hace que la corriente alterna de prueba induzca una tensión en el electrodo de potencial que se suma vectorialmente a la tensión efectiva del SPT bajo estudio.

Los efectos de acoplamiento mutuo serán mayores cuando los electrodos de prueba estén en paralelo, condición que debe evitarse en la medida de lo posible.

No tener en cuenta los efectos del acoplamiento mutuo puede originar un gran error en la determinación de la resistencia de tierra del SPT.

Por esta razón, la norma ya mencionada recomienda que los sistemas de puesta a tierra se midan con **electrodos dispuestos en ángulo**.

Idealmente, si el ángulo entre "P" y "C" es 90° , como se muestra en la figura siguiente, no hay acoplamiento mutuo de ac.

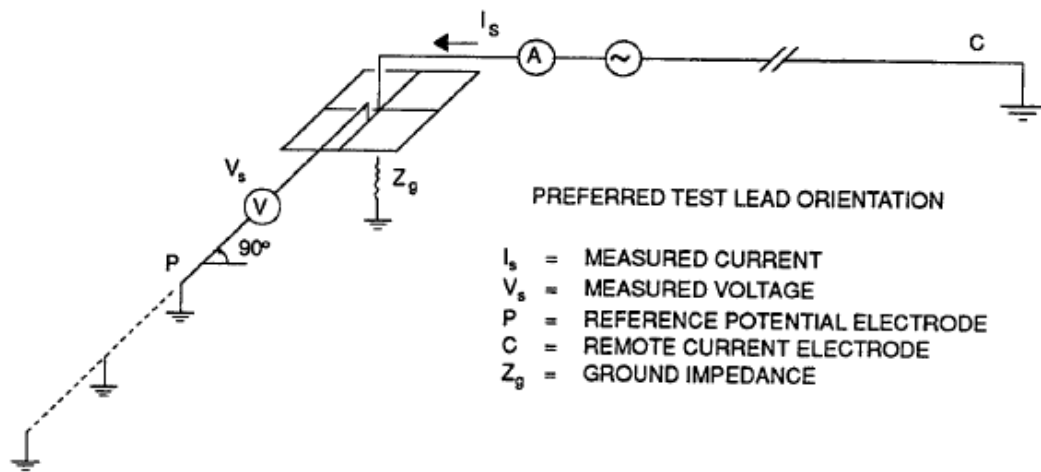


Figura 5.9

Sin embargo, en la práctica orientar los electrodos de prueba en un ángulo recto no siempre es posible o práctico para realizar las mediciones.

Con un ángulo menor de 90° , cualquier tensión producida en el electrodo de potencial, P, debido al acoplamiento de corriente que fluye en el electrodo de corriente, C, es aditivo a la tensión medida deseada y produce un error de medición.

Con ángulos mayores de 90° , se produce el efecto opuesto; la tensión debida al acoplamiento mutuo es negativa y se traduce en una reducción de la medida de impedancia.

Por ejemplo, en la figura 5.10 no se producen efectos de acoplamiento mutuo cuando se ubica al electrodo de potencial "P" en la posición 2. Sin embargo, si colocamos este electrodo "P" en las posiciones 1 o 2, el potencial medido se verá alterado por acoplamiento mutuo.

- 1 = Electrodo de Potencial a menos de 90° del electrodo de Corriente.
- 2 = Electrodo de Potencial a 90° del electrodo de Corriente.
- 3 = Electrodo de Potencial a más de 90° del electrodo de Corriente.

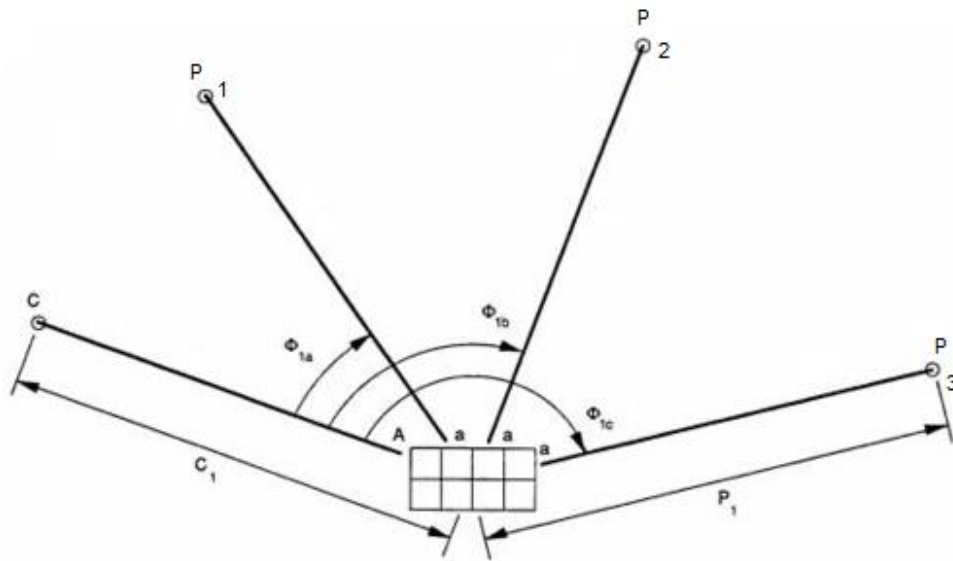


Figura 5.10

Es importante también tener en cuenta el acoplamiento del electrodo del SPT con otros conductores eléctricos enterrados como ser sistemas de comunicación, cañerías de gas o agua, otros SPT, etc. pues a los fines eléctricos se forma un gran SPT extendido y esto dificulta la ubicación del electrodo de potencial “P” en ángulos.

Asimismo, la vasta extensión de este SPT exige utilizar conductores de gran longitud para colocar el electrodo “P” lo suficientemente alejado.

No obstante, si es el propio electrodo del SPT, el que drena a tierra la mayor parte de la corriente, la influencia de los extensos conductores dispuestos en paralelos y acoplados a dicho SPT se ve minimizada, debido que ellos solo derivaran a tierra una pequeña porción de la corriente.

Para mayor información sobre el fenómeno de acoplamiento mutuo en mediciones de resistencia de puesta a tierra, se recomienda al lector dirigirse a la norma IEEE Std. 81.2, (1991).

Finalmente si podemos suponer que no existen influencias por acoplamiento mutuo o de cualquier otra naturaleza que alteren las mediciones y teniendo los electrodos de corriente “C” y potencial “P” en tierra remota, la resistencia o impedancia de puesta a tierra se pueden encontrar por la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{V_s}{I_s}$$



6.1. Instrumentos de Medición. Esquemas de Conexión.

En función al método de medición seleccionado y según lo descrito anteriormente, el montaje y conexionado de los instrumentos de medición se realiza como se detalla a continuación en las figura 5.11 a y 5.11 b.

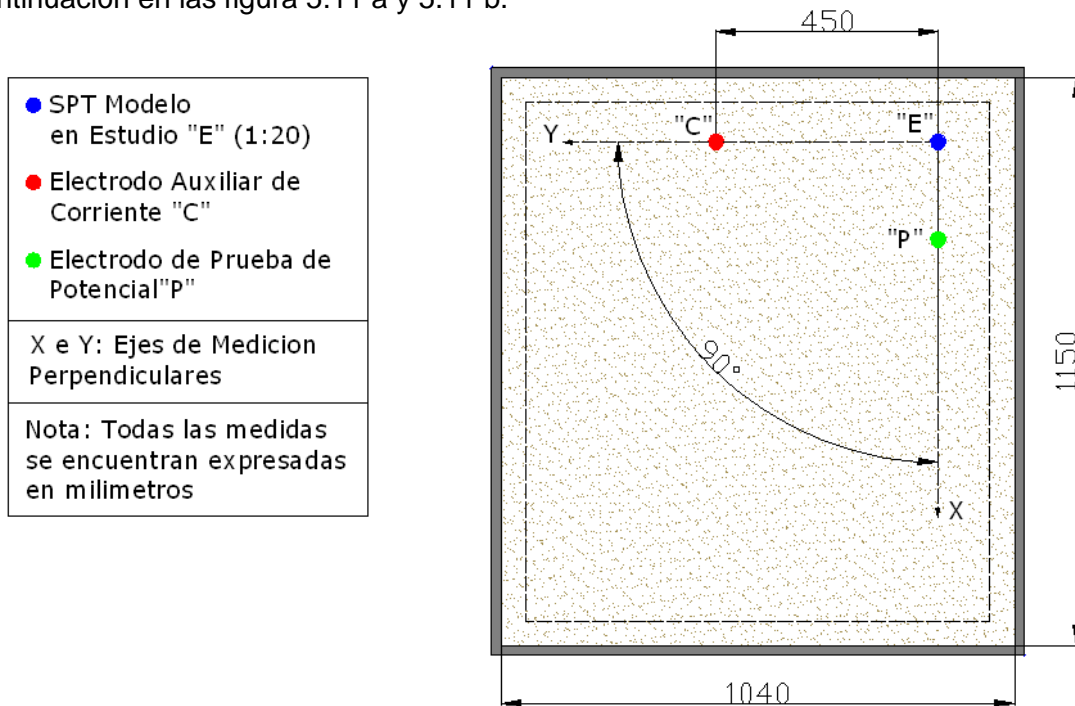


Figura 5.11 a

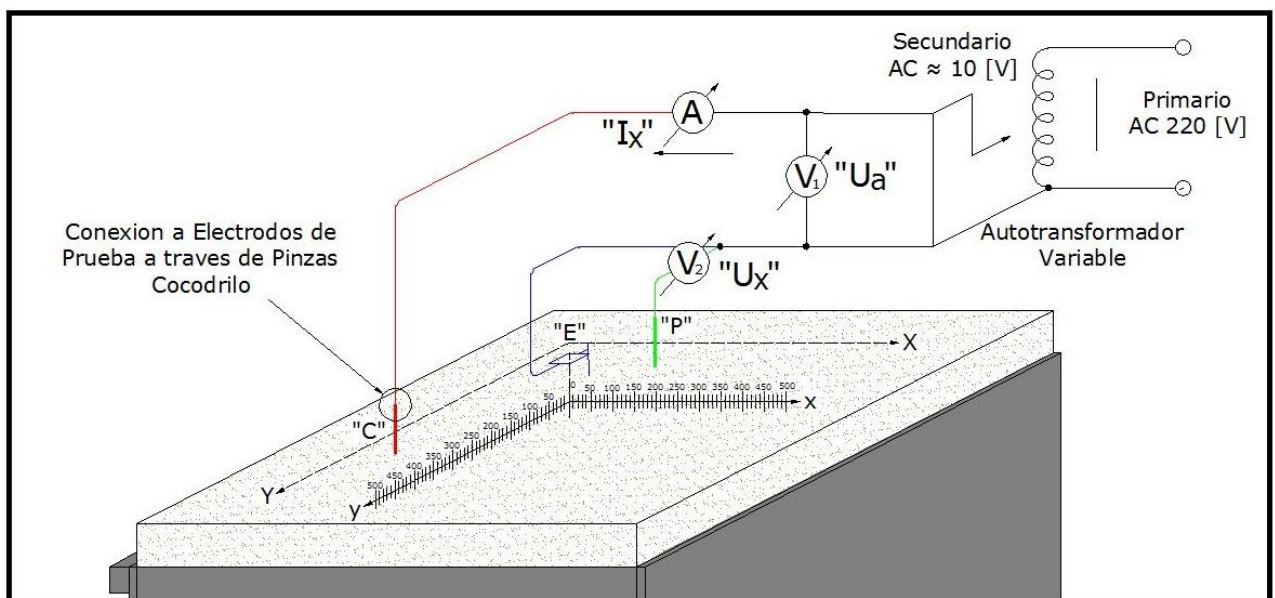


Figura 5.11 b



Como se discutió en la IEEE Std. 81.2, (1991), punto 6.1, si los electrodos de “C” y “P” se sitúan aproximadamente 6,5 veces la máxima diagonal del SPT, entonces se medirá 95% de la resistencia de puesta a tierra.

Espaciamientos del electrodo de 50 veces la máxima diagonal del SPT darán una precisión de medición del 98,5%.

En el presente y debido a las dimensiones del cajón impermeable, es imposible realizar mediciones con el orden de 50 veces la máxima dimensión del SPT, aspecto que tampoco justifica su empleo siendo que solo se gana el 3,5 % de exactitud.

Una vez instalado el SPT modelo bajo estudio “E”, en el suelo loésico, se coloca el electrodo auxiliar de corriente “C”, a una distancia de aproximadamente 6,5 veces la longitud de la diagonal del SPT en estudio, (450 mm), para poder representar correctamente la curva de potencial y evitar los efectos de mutua interferencia entre dichos electrodos, tal como se recomienda en párrafos anteriores. Estos dos electrodos (“E” y “C”), se conectan a los bornes de salida del autotransformador variable de corriente alterna (Variac), cerrando el circuito principal de corriente.

El electrodo de prueba de potencial “P”, se vincula al SPT en estudio con el objeto de registrar distintas mediciones de tensión, a medida que esta se aleja de “E”, conformando el circuito secundario de tensión.

El voltímetro “V1”, será conectado a los bornes de salida del autotransformador con el propósito de controlar en todo momento de la medición, la tensión de alimentación “Ua”.

Así mismo, el voltímetro “V2”, se vincula al circuito de tensión entre el SPT en estudio “E” y el electrodo de prueba de potencial “P”, con la finalidad de proporcionar distintos valores de medición de la tensión “Ux” del sistema en estudio, a medida que el electrodo de prueba se desplaza.

El amperímetro “A” es conectado al circuito de corriente, entre el electrodo auxiliar “C” y el borne del autotransformador, con la intención de controlar la corriente de circulación “Ix”, durante el tiempo que se lleve a cabo la medición.

Los elementos e instrumentos a utilizar en dicha medición se detallan a continuación:

1. Para la medición de corriente se empleará un Multímetro digital (A1), marca LEM, modelo UNIGOR 390, conectado tal como se indica en la figura 5.11 b.
El mismo instrumento se utilizara también para las mediciones de tensión, (V1 y V2), también conectados como se indica en la figura 5.11 b.



Las características técnicas de dicho Multímetro se especifican a continuación:

- Origen: Australia.
- Display: Triple display digital.
- Cantidad de dígitos: 5 $\frac{3}{4}$.
- Cuentas: 310000.
- Memoria interna: 128 [kB].
- Peso del instrumento: 350 [gr].
- Tamaño del instrumento: 195x84x35 [mm].
- Fuente de alimentación: 2 Baterías de 1,5[V] (LR6).
- Protección / Normas seguridad: Fusibles: 1,6[A] / 16[A] / CE / EN 61010-1. CAT. III 1.000[V].
- Selección de rango: manual / autorango.
- Rango de medición:

MAGNITUD	ESCALA	RESOLUCIÓN	PRECISIÓN
Tensión DC/AC	300[mV] – 1.000[V]	1[μ V] AC/DC	\pm (0,02% + 5dig.)
Corriente DC/AC	300[μ A] – 10[A]	1[nA] AC/DC	\pm (0,5% + 2dig.)
Potencia	1[mW] – 10[kW]	1[mW]	-
Resistencia	300[Ω] – 30[M Ω]	1[m Ω]	\pm (0,05% + 5dig.)
Capacidad	3[nf] – 30[mf]	1[pF]	\pm (1% + 2dig.)
Frecuencia	300[Hz] – 300[kHz]	0,001[Hz]	\pm (0,05%)
Temperatura	-270[$^{\circ}$ C] – 1.372[$^{\circ}$ C]	0,1[$^{\circ}$ C]	-
PT100/Termopar	-200[$^{\circ}$ C] +850[$^{\circ}$ C]	-	-

- Prueba de continuidad: < 300 [Ω]

2. Variac Autotransformador de corriente alterna de las siguientes características:

- Potencia nominal: 1 [kVA].
- Dimensiones: 240x170x175 [mm].
- Peso: 7,2 [Kg].
- Tensión de entrada: 110 [V] ó 230 [V] AC, 50/60 [Hz].
- Tensión de salida (variable): 0 – 240 [V] AC, 50/60 [Hz].

(Ver figura 5.11 b).

3. SPT modelo en estudio “E”, de las características y dimensiones descriptas anteriormente.



4. Electrodo auxiliar de corriente "C", de características y dimensiones similares a la Jabalina utilizada en el SPT modelo.
5. Electrodo de prueba de tensión "P", de características y dimensiones similares a la Jabalina utilizada en el SPT modelo.
6. Cables de conexión, pinzas y fichas, etc.



Figura 5.12. Elementos utilizados para la medición.

6.2. Precauciones a Tener en Cuenta Antes de Efectuar la Medición.

1. Aislar o alejar el entorno de trabajo de toda posible perturbación de origen telúrico o industrial, con el objeto de evitar la presencia de corrientes vagabundas que podrían influir en las mediciones.
2. Para disminuir el acoplamiento inductivo entre los conductores de alimentación y los conductores de medición, se alejan al máximo unos de otros y si es posible en direcciones relativamente opuestas.
3. La corriente a través de conductores en paralelo producen campos magnéticos, que interactúan entre sí. Para evitar que estos campos magnéticos produzcan interferencias, se trenzan los conductores de alimentación (par trenzado), con el objetivo de formar bucles cerrados que reduzcan el área del flujo magnético, y que los campos producidos en cada bucle tengan direcciones opuestas, logrando así que la f.e.m. inducida en cualquier bucle sea opuesta al bucle siguiente.



4. Así mismo, para evitar la corriente de modo común que se podrían originar a través de los conductores de puesta a tierra de los aparatos, debido a cualquier tipo de acoplamiento, se vinculan los mismos a un solo punto de tierra de referencia.
5. Los instrumentos eléctricos empleados no deben ser sensibles a las corrientes errantes. Es por eso, que se coloca a los bornes del voltímetro "V1", una resistencia del orden de los 40 MΩ, con el objeto de obtener en paralelo junto con la resistencia interna del voltímetro, una resistencia equivalente de menor valor óhmico, y a su vez disminuir la sensibilidad de dicho instrumento.
6. Todas las precauciones y aplicaciones posibles para mantener el entorno del laboratorio a temperatura ambiente ($T_{amb.}=25^{\circ}C$).
7. Las fuentes de corriente utilizadas deben suministrar para este método corrientes del rango de 0,1 A a 10 A. en nuestro caso se utilizaran corrientes del orden de los 15 mA y frecuencia de red de 50Hz.
8. Polarización:

Dadas las condiciones de frecuencia industrial (baja frecuencia) y características del suelo nombradas en el punto 2.3, se puede esperar una polarización espacial en el suelo, el cual se caracterizó como de baja superficie específica.

Cuando se realizan las mediciones se puede ver que aplicando una tensión constante "Ua", la corriente circulante por el cajón impermeable, disminuye con respecto al tiempo. Esta, es una característica típica de la polarización. La cual se explica en el punto 2.3 por una disminución del campo eléctrico por el fenómeno de polarización.

Esta característica de variación de corriente presenta dificultades para realizar las mediciones, por lo que se realizó un ensayo para verificar desde que momento esta corriente se estabiliza para poder realizar mediciones.

Se puso en serie con el circuito de corriente un miliamperímetro marca LEM, modelo UNIGOR 390 que posee las características vistas en el capítulo 5, punto 6.1 y como alimentación se utilizó un variac autotransformador de corriente alterna cuyas características se detallan en 5.6.1 con un voltímetro "V1" del tipo LEM, modelo UNIGOR 390. El esquema de conexión es el siguiente:

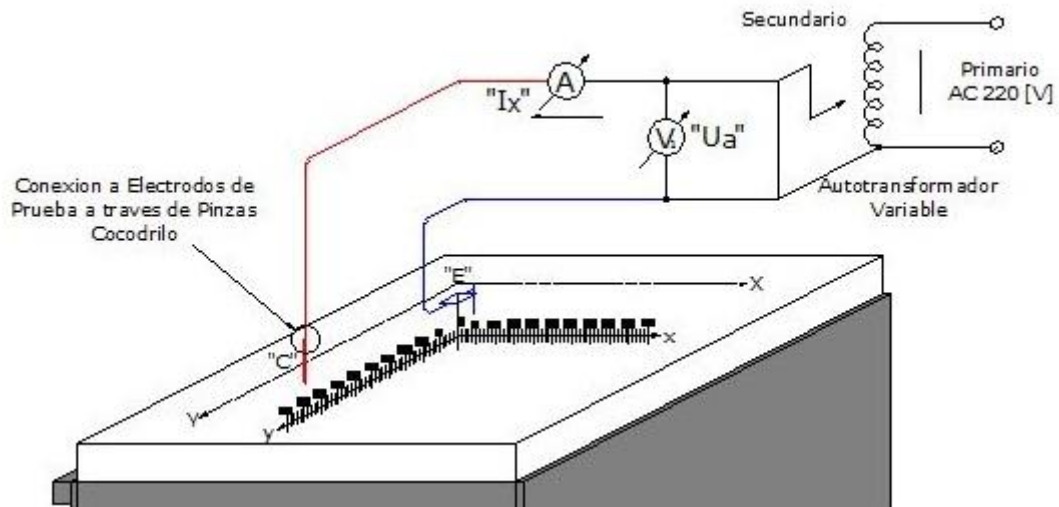


Figura 5.13. Esquema de conexión para medición de corriente en función del tiempo.

Una vez dispuesto esto en el cajón se aplicaron tensiones de 80 V y 50 V y se levantaron los datos de tiempo y corriente. Dichos datos se detallan en el anexo "Polarización".

Cabe destacar también que cuando se quita la tensión aplicada U_a , se deberá esperar un tiempo prudente para empezar a realizar otra medición debido a que debe darse el fenómeno de despolarización, el cual es inverso al de polarización. En nuestro caso, las mediciones se realizaron esperando 24 horas entre medición y medición para asegurar que no existan perturbaciones de este tipo.



Los gráficos obtenidos son los siguientes:

$I(t) ; V = 80 \text{ V}$

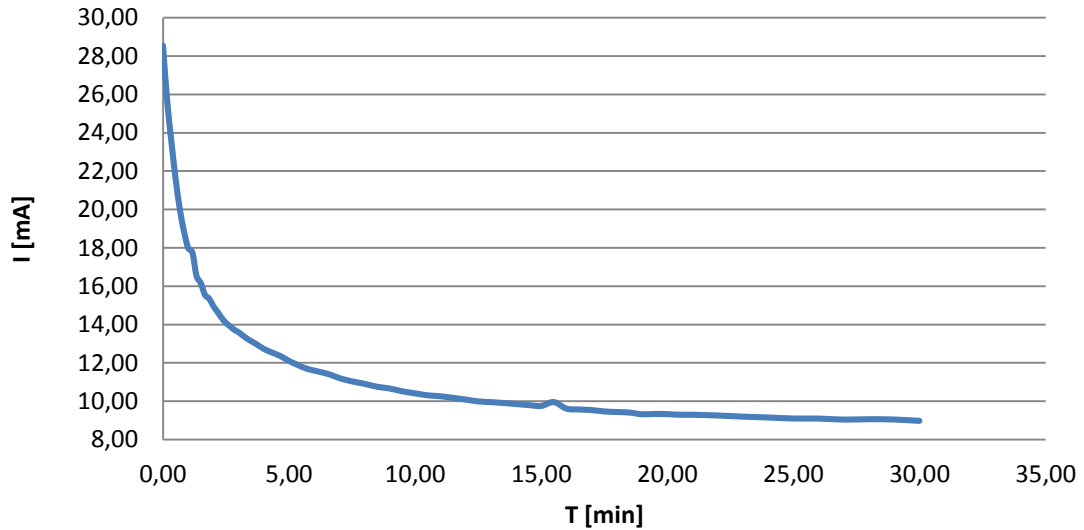


Figura 5.13: Corriente en función del tiempo para tensión aplicada de 80 V.

$I(t) ; V = 50 \text{ V}$

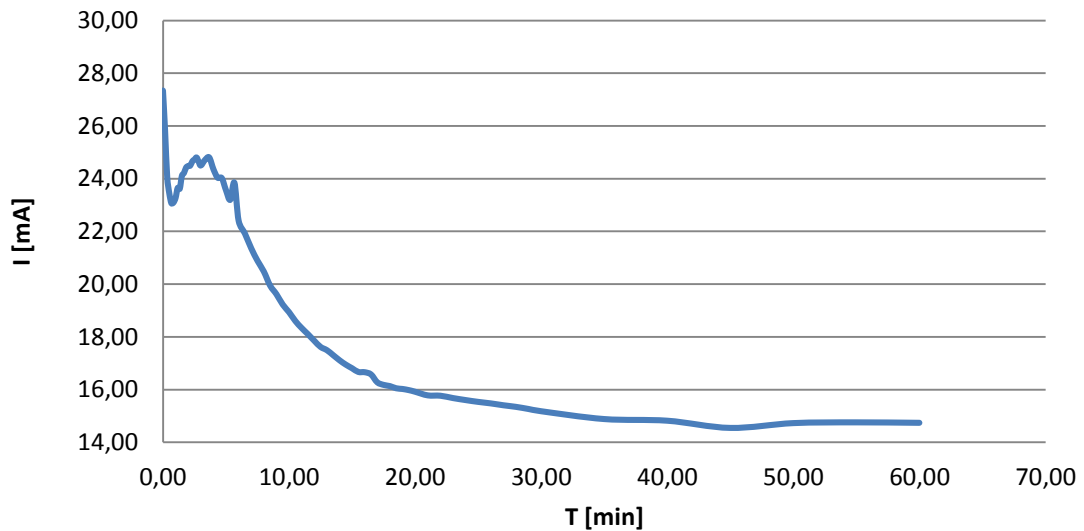


Figura 5.14: Corriente en función del tiempo para tensión aplicada de 50 V.



Como se puede apreciar, y pese a una posible perturbación observada en la figura 5.14. Aproximadamente a los 5 minutos de haberse aplicado la tensión U_a , a partir de los 30 minutos, la corriente que circula permanece aproximadamente constante tanto para los valores de 80 V como para los de 50 V.

Habiendo dicho esto se tendrá como precaución para realizar las mediciones un tiempo de 45 minutos de establecida la corriente para realizar las mediciones pertinentes.

6.3. Procedimiento.

Teniendo en cuenta el conexionado y montaje descrito en párrafos anteriores, se procede a la toma de mediciones tal como se indica a continuación:

- 1) Ejecución del montaje y conexionado tal como se muestra en el esquema de conexión de la figura 5.11 b. Tomar todas las precauciones indicadas previas a las mediciones;
- 2) Fijar la tensión de alimentación " U_a ". Para esta medición el valor eficaz de dicha tensión estará en el orden de los 50 [V];
- 3) Registrar las lecturas del voltímetro " V_2 " y el amperímetro " A ", de todos los valores obtenidos de tensión " U_x " y de corriente " I_x " respectivamente, a medida que se desplaza el electrodo de prueba de potencial " P ", alejándolo desde el SPT modelo en estudio " E ";
- 4) Representar la curva de potencial correspondiente a la variación de tensión " U_x " con respecto a la distancia de espaciamiento " x ", y analizar el comportamiento de la misma;
- 5) Determinar el valor real de la Resistencia de puesta a tierra correspondiente al sistema en estudio, objeto de dicha medición.

Medición N°1.

Medición de un Sistema de puesta a tierra modelo construido según las especificaciones del TC1206 de la EPEC, cuyas dimensiones y características ya fueron definidas en párrafos anteriores.



Datos de la medición:

- Tensión alterna de alimentación “ U_a ” = 50,75 [V].
- Frecuencia de trabajo = 50 [Hz].
- Resistividad promedio del terreno (valor escalado) $\rho_a = 40,679$ [Ω .m].
- Resistividad promedio del terreno (valor no escalado) $\rho_b = 813,589$ [Ω .m].
- Grado de compactación del terreno (suelo loésico) = 91,5 %.
- Humedad del terreno (suelo loésico) = 7,5 %.
- Temperatura del ambiente del laboratorio = 25 [°C].

Resultados obtenidos:

Los resultados obtenidos a partir de las lecturas de la medición, se muestran en el anexo “Medición RPaT”.

Como se puede observar en dicho anexo, los valores de las distintas lecturas varían a medida que aumenta la distancia de espaciamiento “ x ”, señal de que la técnica de modelización a escala de sistemas de puesta a tierra, actúa de manera correcta.

En el caso de los valores de la corriente “ I_x ”, varían levemente en el orden de los [mA] aproximadamente entre el valor inicial y final, por lo tanto, podría considerarse como la circulación de una corriente alterna casi constante. Para el caso de los valores de la tensión “ U_x ”, el análisis de la variación de los mismos y su comportamiento se pueden apreciar con mayor claridad en la representación de la curva de potencial de la figura 5.15, tal como se detalla a continuación.

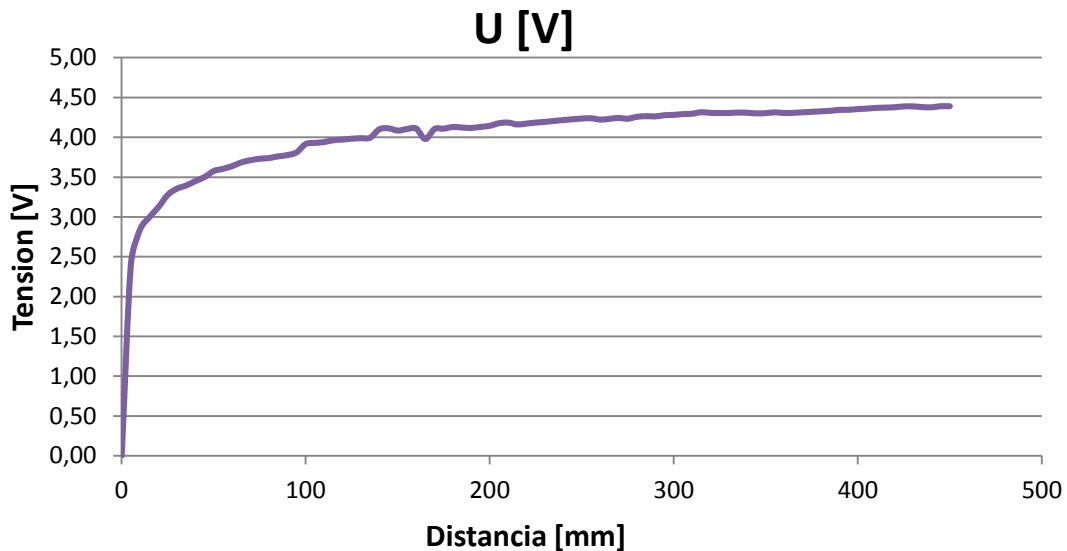


Figura 5.15. Curva de potencial medición RPaT.

Curva de potencial de la Medición N°1:

Las consideraciones descriptas anteriormente y el comportamiento del sistema en estudio se pueden comprender con mayor claridad en la representación de la curva de potencial con respecto a la distancia de espaciamiento “x”, tal como se muestra en la siguiente figura 5.15:

Como se puede observar en el gráfico, la trayectoria obtenida reproduce un perfil similar a la forma deseada de las curvas típicas de los sistemas de puesta a tierra tradicionales, tal como se aprecia en el Capítulo N°1 del presente Proyecto Integrador. Así mismo, esta curva se encuentra conformada por tres zonas o intervalos que se pueden apreciar bien definidas y que se detallan a continuación:

Zona N°1: (Aproximadamente entre $x=0$ y $x=45$ mm), inicialmente los valores de tensión “Ux” crecen abruptamente, siguiendo una trayectoria de pendiente ascendente;

Zona N°2: (Aproximadamente entre $x=45$ mm y $x=300$ mm), luego los valores comienzan a variar levemente, casi constantes y siguen una trayectoria de pendiente considerablemente reducida, lo cual podemos deducir que la separación entre el SPT en estudio “E” y el electrodo auxiliar de corriente “C” es lo suficientemente distante como para minimizar los efectos de mutua interferencia entre dichos electrodos;

Zona N°3: (Aproximadamente entre $x=300$ mm en adelante), finalmente los valores vuelven a crecer en forma muy abrupta, siguiendo una trayectoria de pendiente pronunciada ascendente que tiende a infinito.



A partir de la relación entre los valores de la diferencia de potencial “Ux” y la corriente “Ix”, se puede representar la curva de resistencia de dispersión a tierra “Rx” del sistema en estudio, tal como se observa en la siguiente figura 5.16:

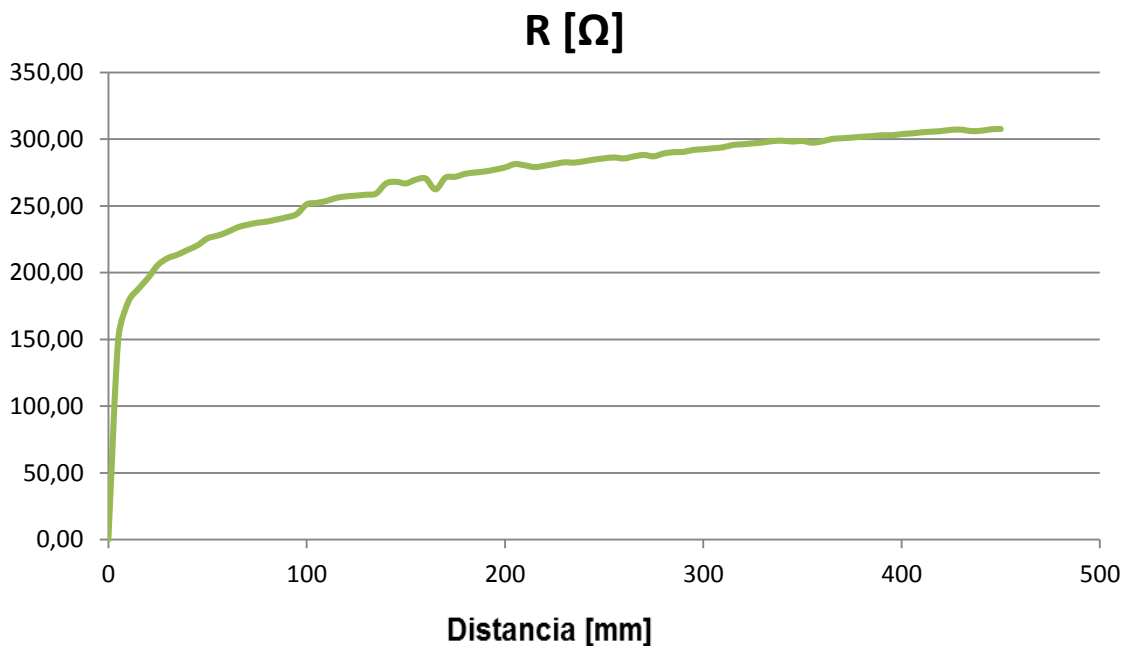


Figura 5.16. Variación del valor de RPaT según la distancia.

Como se observa en la figura 5.16, el perfil de dicha curva posee idéntica apariencia con respecto a la curva de potencial representada en la figura 5.15, respetando las tres zonas o intervalos descritos anteriormente. Esto es debido a que como dijimos previamente, la corriente alterna “Ix” se mantiene casi constante en todo el lapso que dura la medición.

Se tomará como valor más próximo al real, al que corresponde a la mayor distancia “X”, la cual es 450 mm. La norma IEEE Std. 81.2, (1991), especifica que dicho es el más alejado del sistema de puesta a tierra que no se vea afectado por la interferencia del electrodo auxiliar de corriente “C”. Para nuestro caso, que medimos en cuadratura, esta interferencia no se ve reflejada en las mediciones y se toma como valor más próximo como se dijo al de mayor distancia “X”

Para obtener dicho valor se utiliza la ley de Ohm, utilizando los valores de tensión “Ux” e “Ix” correspondientes a $X = 450 [mm]$.



$$R_{PaTm} = \frac{4,391 [V]}{14,276 [mA]} = 307,579 [\Omega]$$

Donde R_{PaTm} es la resistencia de puesta a tierra del sistema medida.

6.4. Comparación de Valores Medidos y Calculados de Resistencia de PaT.

En el punto 4 del presente capítulo se realizaron los cálculos teóricos pertinentes para la determinación de la resistencia de puesta a tierra de nuestro sistema, con el objeto de poder compararlos y determinar así la correlación existente entre los cálculos teóricos y las mediciones para posteriormente poder hacer uso de estas herramientas.

En la siguiente tabla 5.3 se hace una comparación de los valores obtenidos en cada una de las teorías de cálculo y los valores obtenidos en la medición:

Teoría:	Teórico [Ω]	Medido [Ω]	Error
Método Cilindro esfera	275,426	307,579	-10,45%
Método Elipse	280,505		-8,80%
Método corriente a lo largo de un electrodo	284,403		-7,54%
Método AEA 90364-7-771, (2006)	278,430		-9,48%
Método Arcioni	275,465		-10,44%
Método IEEE Std. 80-2000	278,430		-9,48%

Tabla 5.3: Diferencias entre valores de R_{PaT} calculados y medidos para el SPT usado en SE del tipo monoposte.

Como puede observarse, todas las teorías de cálculo se establecen en un valor alrededor del 10% menor que el valor que tomamos como real, es decir, el medido. Siendo con este criterio la teoría más acertada la de corriente a lo largo de un electrodo.

Conclusiones de la Medición del SPT.



En definitiva, según los resultados alcanzados en la medición y respetando las hipótesis definidas anteriormente, se puede expresar las siguientes conclusiones:

- 1- Los valores obtenidos en la medición, representan idénticamente la trayectoria de la curva de potencial característica de los sistemas de puesta a tierra tradicionales;
- 2- Se pudo determinar el valor de la resistencia de puesta a tierra correspondiente al sistema en estudio, mediante mediciones obtenidas por el Método de la Caída del Potencial;
- 3- El modelo a escala del SPT desarrollado, se encuentra apto para estudiar distintas alternativas de trabajo y solicitaciones, debido a que cumple perfectamente con el comportamiento de un SPT real y reproduce idénticamente las características deseadas que se observan en las distintas teorías, objeto de la validación o viabilidad de la técnica de modelización a escala.



7. Extrapolación de Resultados a SPT Utilizados en Subestaciones Biposte.

Con el fin de poder medir sistemas compuestos por mallas de dimensiones mayores a las permitidas, Carvajal, (2004) propone la siguiente teoría:

“Para sistemas de puesta a tierra que tengan dos ejes de simetría, se propone obtener sus características eléctricas a través del ensayo de un segundo sistema que sea igual a una cuarta parte del primero”.

Esta teoría validada por su autor en, permite ensayar solo una parte del sistema y extrapolar los resultados al sistema completo.

Evidentemente para que esta teoría sea válida, se debe cumplir que la parte que se ensaya sea geoméricamente igual a todas aquellas otras partes elementales del sistema que no se ensayan, porque de lo contrario sería imposible extrapolar los resultados de la medición.

Sin cometer grandes errores podemos considerar la malla utilizada para aterrizar las subestaciones del tipo constructivo monoposte, como la mitad del SPT utilizado para el mismo propósito en subestaciones biposte, nos proponemos extrapolar los resultados de un tipo constructivo al otro.

La resistencia del SPAT medido (monoposte) es dos veces mayor que la resistencia del SPAT no medido (biposte), ya que el SPAT usado en subestaciones biposte es, dimensionalmente hablando, el doble del SPAT utilizado en subestaciones monoposte y por consiguiente presenta una superficie de dispersión igual a la mitad de la que presenta el SPAT biposte.

$$SPT \text{ biposte} = \frac{SPT \text{ monoposte}}{2} = \frac{307,579 [\Omega]}{2} = 153,790 [\Omega]$$

De la misma manera que en el caso de la monoposte se realizaron los cálculos teóricos para determinar de esa forma el valor de RPaT para el tipo Biposte, en la siguiente tabla 5.4 se muestran sus valores comparados con el que hubiera resultado de la medición.



Teoría:	Teórico [Ω]	Medido [Ω]	Error
Método Cilindro esfera	152,082	153,790	-1,11%
Método Elipse	152,746		-0,68%
Método corriente a lo largo de un electrodo	153,255		-0,35%
Método AEA 90364-7-771, (2006)	152,475		-0,85%
Método Arcioni	152,087		-1,11%
Método IEEE Std. 80-2000	152,475		-0,85%

Tabla 5.4: Diferencias entre valores de RPaT calculados y medidos para el SPT usado en SE del tipo biposte.

En este caso podemos visualizar que la diferencia entre los valores obtenidos a partir de las mediciones y extrapolados según la teoría expuesta por Carvajal (2004), se condice con los cálculos teóricos.



CAPITULO 6:





1. Análisis y Discusión de los SPT del TC1206.

En el presente capítulo se pretende realizar un análisis crítico basado en las mediciones, cálculos y observaciones realizadas sobre los SPT bajo estudio.

Como ya se mencionó repetidas veces antes, los SPT estudiados son los usados por la EPEC en las subestaciones aéreas transformadoras de tipos constructivos monoposte y biposte.

1.1. Sección Nominal y Material del Conductor del TC1206.

En lo que se refiere a la sección, recordemos lo que indica el TC1206:

“La malla estará constituida por alambres de cobre de $3,5 [mm]$ de diámetro mínimo y en un número tal que la sección no sea inferior a $25 [mm^2]$ o por cable de cobre de 3 o 7 alambres con $25 [mm^2]$ de sección mínima.”

Los electrodos que se encuentran en contacto con el suelo deben ser de materiales capaces de resistir la corrosión, y resistir las influencias mecánicas durante su montaje así como durante su funcionamiento.

A tal efecto la Reglamentación establece la aplicación solamente de dispersores que tengan un comportamiento catódico, a efectos de evitar su corrosión, citando algunos tipos sobre los que proporciona medidas mínimas que garanticen su integridad física.

- Barra redonda de Cu de $50 [mm^2]$. ($35 [mm^2]$ para electrodo horizontal).
- Cable (de varios alambres) de Cu de $35 [mm^2]$.
- Barra redonda de acero-cobre, de $12,6 [mm]$ mínimo, según norma IRAM 2309.

El cobre, además de ser catódico, presenta una alta capacidad calorífica.

Al tener el electrodo comportamiento catódico, es de prever que pueda afectar a otros elementos enterrados de características anódicas. A tal efecto, si fuese necesario pueden considerarse las siguientes medidas:

- Estañado del Cu (riesgo de corrosión localizada en puntos con cobre expuesto).
- Disposición de electrodos a 90° con traza de elementos de hierro enterrados.
- Aislación de partes de Fe afectadas.
- Protección catódica.



1.1.1. Verificación de la Sección del Conductor.

Según la metodología de cálculo brindada por la norma IEEE Std. 80, (2000) la sección del conductor del electrodo dispersor del SPT, puede determinarse en función de las siguientes variables:

Material del Conductor.

Para cada tipo de material la norma citada brinda sus características físicas y eléctricas en la Tabla 1 de la sección 13.3.

Se distinguen cuatro tipos de conductores de cobre de interés, entre cables de cobre con distintas técnicas de fabricación hasta barras y alambres de acero revestidos en cobre, cada uno de estos conductores tiene distintas características, como se muestra a continuación en la tabla 1:

Descripción	Conductividad %	α_r [1/°C]	k_0 [0°C]	Temperatura de fusión T_m [°C]	ρ_r [$\mu\Omega\text{cm}$]	Capacidad térmica TCAP [$\text{J}/\text{cm}^3\text{°C}$]
Cobre Comercial, estirado en frío	100,0	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Alambre de Acero revestido en cobre	40,0	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Alambre de Acero revestido en cobre	30,0	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Barra de Acero revestida en cobre	20,0	0,00378	245	1084	8,62	3,85

Tabla 6.1



Corriente de Falla.

La corriente de falla en MT dependerá de la potencia de corto circuito en el punto de la red donde se instala la subestación, este dato es brindado por la empresa distribuidora quien maneja dicha red.

Por supuesto que esta potencia de cortocircuito variara de caso en caso, dependiendo de la posición de dicha subestación en la red de distribución, como así también del tipo de alimentación, que puede ser puramente aérea o tener tramos subterráneos intermedios.

Un análisis posible para evaluar esta corriente es tomar como limitación constructiva la mínima sección propuesta por el TC1206 y verificar la máxima corriente admisible.

Aplicando el método de cálculo propuesto por la AEA en su curso "Tratamiento de neutro y puesta a tierra", Modulo 6, (2012) la corriente de falla admisible por un conductor de 25 mm de sección es:

$$S = \frac{\sqrt{I_f^2 * t_c}}{k}$$

$$I_f = \sqrt{\left(\frac{(S * k)^2}{t_c}\right)}$$

$$I_f = 3,85[kA]$$

Dónde:

$k = 0,175 [kA/mm^2]$ para Cu y $t_c = 0,5[s]$, $T_{final} = 250[°C]$.

$k = 0,109 [kA/mm^2]$ para Cu y $t_c = 0,5[s]$, $T_{final} = 300[°C]$.

Se escoge el valor más pequeño de k, para abordar el problema desde el lado de la seguridad.

Aun así cabe señalar que la empresa distribuidora utiliza impedancias limitadoras de corrientes de falla que fijan un límite máximo de corriente en el orden de los $800[A]$ en sistemas de $13,2 [kV]$.



Tiempo de Duración de la Falla.

El tiempo de duración de la falla estará dado por las protecciones del lado de MT, que suelen ser fusibles del tipo XS, cuya curva de actuación, y en función de la corriente de falla ya vista, brindara el tiempo de actuación de dicha protección.

Como regla general, y a efectos de tener selectividad de las protecciones, este tiempo no deberá ser nunca inferior a los $100 [ms]$ ni superior a los $500 [ms]$ para no interferir en la coordinación de las protecciones del sistema de distribución primaria.

Temperatura Ambiente.

Según especifica la AEA en su publicación: "Tratamiento de neutro y puesta a tierra", Modulo 6, (2012) esta temperatura debe tomarse como $40 [^{\circ}C]$.

Temperatura de Fusión.

Según lo indicado por la norma IEEE ya antes citada dicha temperatura para el cobre resulta ser de $1084 [^{\circ}C]$, sin embargo cuando se practican soldaduras exotérmicas sobre el SPT, no hay que dejar de tener en cuenta la máxima temperatura admisible por ellas, la AEA recomienda no superar los $450 [^{\circ}C]$ para evitar causar daños sobre la integridad de la soldadura en cuestión.

En función de todo lo anterior se muestran en las siguientes figuras 6.1 a, b, c, y d, la relación existente entre la sección del conductor del SPT y la corriente de falla, para distintos tiempos de actuación de la misma.

$$I_F = \frac{A}{\sqrt{\left(\frac{t_c * \alpha_r * \rho_r * 10^4}{TCAP * \ln \left[1 + \left(\frac{Tm - Ta}{ko + Ta} \right) \right]} \right)}}$$

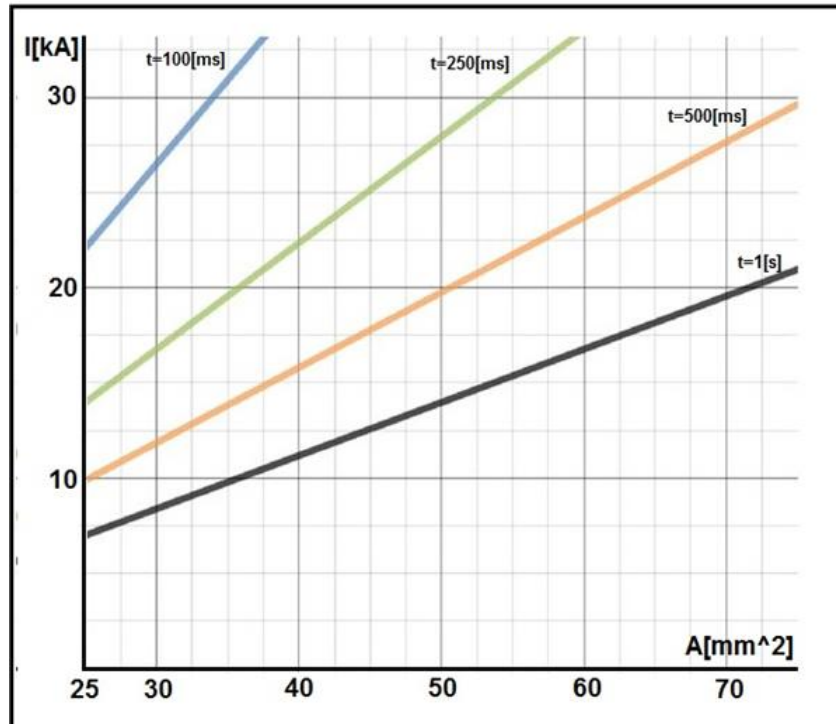


Figura 6.1 a: Corriente de falla en función de la sección del conductor para cobre comercial estirado en frío ρ_r $20^\circ\text{C} = 1,78 (\mu\Omega\text{cm})$.

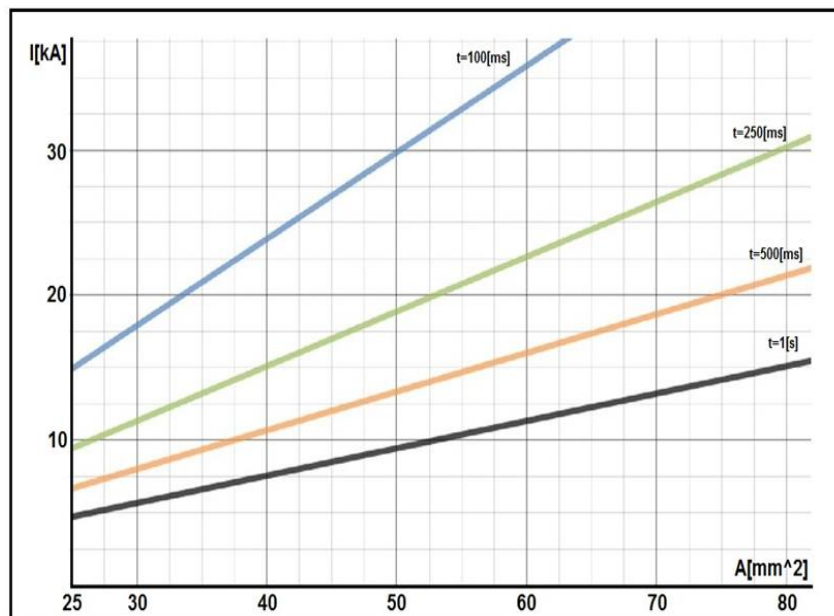


Figura 6.1 b: Corriente de falla en función de la sección del conductor para alambre de acero revestido en cobre ρ_r $20^\circ\text{C} = 4,40 (\mu\Omega\text{cm})$.

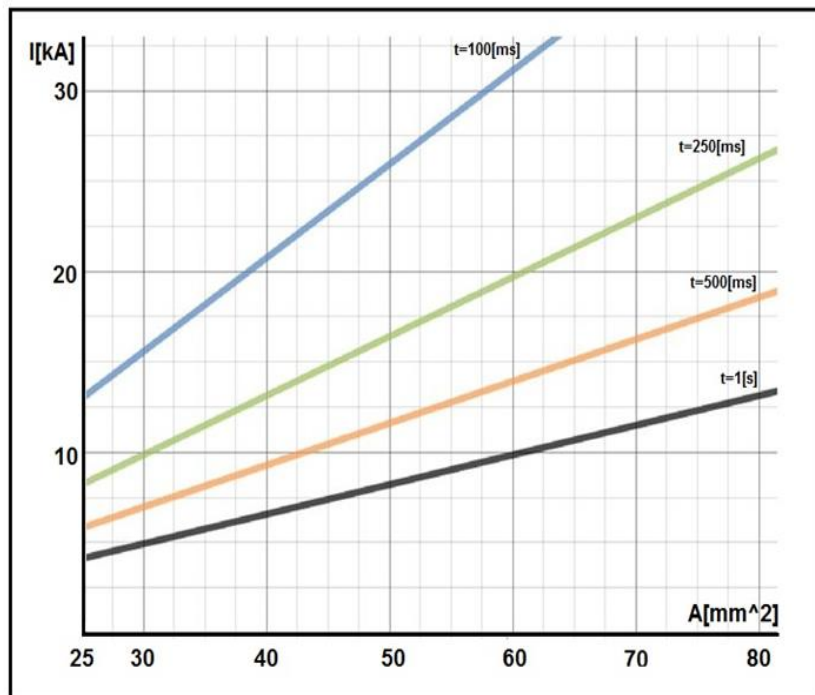


Figura 6.1 c: Corriente de falla en función de la sección del conductor para alambre de acero revestido en cobre ρ_r $20^\circ\text{C} = 5,86 (\mu\Omega\text{cm})$.

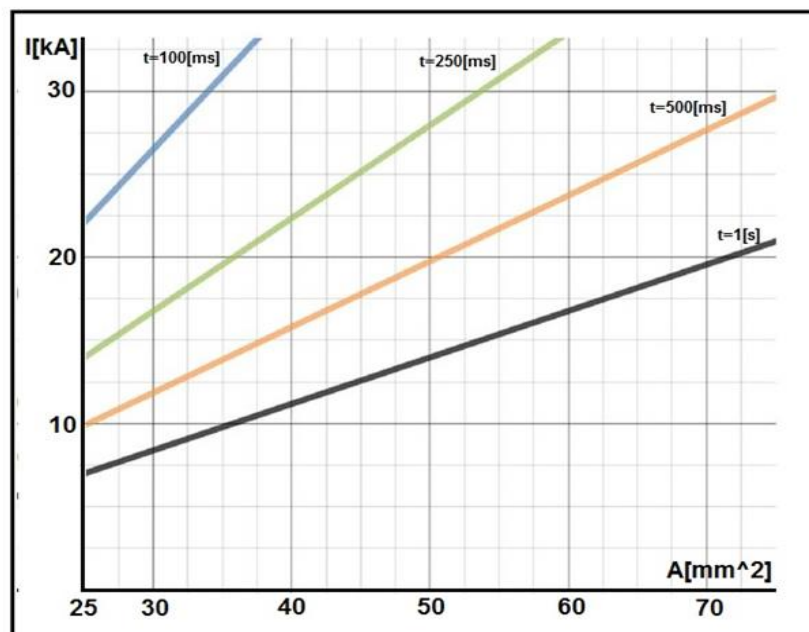


Figura 6.1 d: Corriente de falla en función de la sección del conductor para barra de acero revestida en Cobre ρ_r $20^\circ\text{C} = 8,62 (\mu\Omega\text{cm})$.



Como puede observarse en las figuras anteriores, la sección propuesta por el TC1206, soporta corrientes de falla muy superiores a las que suelen producirse, aun para tiempos de despeje de la falla altos.

1.2. Dimensiones del TC1206.

Los electrodos utilizados se componen principalmente de un lazo de conductor que suele hacerse en obra alrededor del bloque de fundación del poste o de los postes utilizados con el agregado de una o dos jabalinas.

Por lo tanto la longitud resultante de dicho lazo y las medidas de la cuadrícula que este forma, variaran según el caso junto con las fundaciones, los postes y el terreno.

Sin embargo y como ya se dijo el TC1206 especifica dimensiones mínimas para la cuadrícula del electrodo, esto responde al hecho de que en caso de resultar electrodos de mayor longitud estaremos dimensionando la instalación del lado de la seguridad.

Como se cita en la MIE-RAT 13 de la UNESA, no resulta problemático construir electrodos o mallas de puesta a tierra mayores que los electrodos o mallas típicas, dado que, si se tiene la seguridad que el electrodo tipo verifica la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y de contacto, con mayor razón las cumplirá el electrodo real de mayor tamaño a construir, pues al ser de mayores dimensiones, presentara una menor resistencia de puesta a tierra y una mejor disipación de corrientes de defecto

Como se verá más adelante la longitud de la jabalina y del conductor enterrado, y el área que este último encierra al formar la cuadrícula, son factores determinantes sobre la resistencia de puesta a tierra del electrodo que este conductor conforma.

En cuanto a las jabalinas, el TC1206 indica lo siguiente:

“Las jabalinas tendrán por lo menos $1,5 [m]$ de largo y serán caños de cobre o de latón de $20 [mm]$ diámetro con un espesor de pared mínimo de $3 [mm]$, o serán de acero recubierta en una vaina adherida continua de cobre de $1 [mm]$ de espesor medio con un diámetro mínimo de $14 [mm]$ “

No obstante la AEA especifica que la longitud de estas no debe ser inferior a los $2[m]$, puesto que la resistividad del terreno a menor profundidad presentara una fuerte oscilación asociada a la pluvialidad, que es conveniente evitar condición que el TC1206 no contempla.



1.3. Forma del TC1206.

Debido a su geometría el análisis que sigue a continuación, correspondiente al cálculo de tensiones de paso y de contacto sigue los lineamientos dados por la norma IEEE Std.80, (2000).

Este análisis se realiza considerando que la forma constructiva que recomienda el TC1206 puede pensarse como una malla de una única cuadrícula para el caso del electrodo usado en subestaciones monoposte rurales y como una malla de dos cuadrículas para su equivalente en subestaciones biposte urbanas, esta malla además contara con una o con dos jabalinas según sea necesario.

Es importante tener en cuenta que este método de cálculo solo contempla mallas cuyas retículas sean de al menos $2,5 [m]$ de lado, por lo cual su aplicación al tipo constructivo estudiado puede arrojar resultados no del todo exactos.

1.3.1. Verificación de las Tensiones de Paso y de Contacto para el TC1206.

Siguiendo el procedimiento de cálculo que brinda la norma citada, el primer paso consiste en determinar las tensiones de paso y de contacto admisibles por una persona, la norma ofrece dos posibles caso, uno para una persona de $50 [kg]$ y otro para una persona de $70 [kg]$.

Se deberá prestar especial atención al primer caso, dado que es el caso más conservador y teniendo presente que este caso bien podría pensarse como aplicado a la textura física de un niño.

Cada uno de estos dos casos (personas de $50 [kg]$ y de $70 [kg]$) responde además a las siguientes variables:

Resistividad y Espesor del Recubrimiento Superficial.

El lugar de emplazamiento de las subestaciones más común en las zonas urbanas suele ser sobre el cordón de vereda, con lo cual es muy común que los SPTs cuenten con recubrimientos de hormigón y grava de al menos diez centímetros de espesor.

Estos recubrimientos representan una resistencia extra al paso de la corriente por el cuerpo humano y esto se refleja matemáticamente a través de un coeficiente que para el caso citado resulta ser:



$$C_S = 1 - 0,09 \left(\frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + 0,09} \right)$$

La resistividad promedio del hormigón según la IEEE Std. 80, (2000) en caso de hallarse en estado seco ronda los 1×10^6 [Ωm] y los 1×10^9 [Ωm].

Sin embargo otros autores como García Márquez, (1999) proponen para dicho valor los 3000 [Ωm].

Para abordar el estudio desde el lado de la seguridad se adopta el valor que publica esta última fuente.

Finalmente la resistividad típica de un suelo loessico característico de la provincia de Córdoba ronda los 307 [Ωm] según Talocchino-Lozano, (2015).

De todas maneras si el terreno donde se planea emplazar el SPT resulta ser rocoso o de mala conductividad, se recomienda utilizar tierra vegetal, bentonita y/o gel mejorador de resistencia de tierra así como otros métodos de mejora químicos, en el terreno circundante al electrodo de tierra.

Es importante tener en cuenta que las mediciones de la resistividad del terreno deben hacerse en días típicos del lugar, evitando días de lluvia donde el terreno se humedece y su resistividad característica cambia.

Con estos datos y bajo la hipótesis de que el espesor del recubrimiento es de diez centímetros, el coeficiente C_S resulta ser:

$$C_S = 0,72$$

No obstante se sabe que este tipo de subestaciones también suelen ser utilizadas en zonas rurales, donde muchas veces no se cuenta con veredas ni ningún otro tipo de recubrimiento, para estos casos tendremos:

$$C_S = 1$$

Tiempo de Falla para Tensiones Admisibles.

Como ya se mencionó en el capítulo 1 inciso 1.6.2, los efectos que produce la corriente eléctrica en el cuerpo pueden tornarse peligrosos superando ciertos umbrales que dependerán de la frecuencia de la tensión y del tiempo de exposición.



Recordando la figura 1.17, la cual se repite a continuación (figura 6.2) se observa que la corriente eléctrica alterna de frecuencia comprendida entre 15 y 100 [Hz] que el cuerpo humano puede aguantar, se encuentra típicamente en el rango de 60 a 100 [mA] para tiempos de exposición del orden de los 500 [ms].

Es por estos motivos que resulta de vital importancia la velocidad con la que se despejan las fallas.

Un tiempo de actuación de comprendido ente los 100 [ms] y los 500 [ms] es adecuado para proteger a las personas que pudieran ser víctimas de una descarga a tierra.

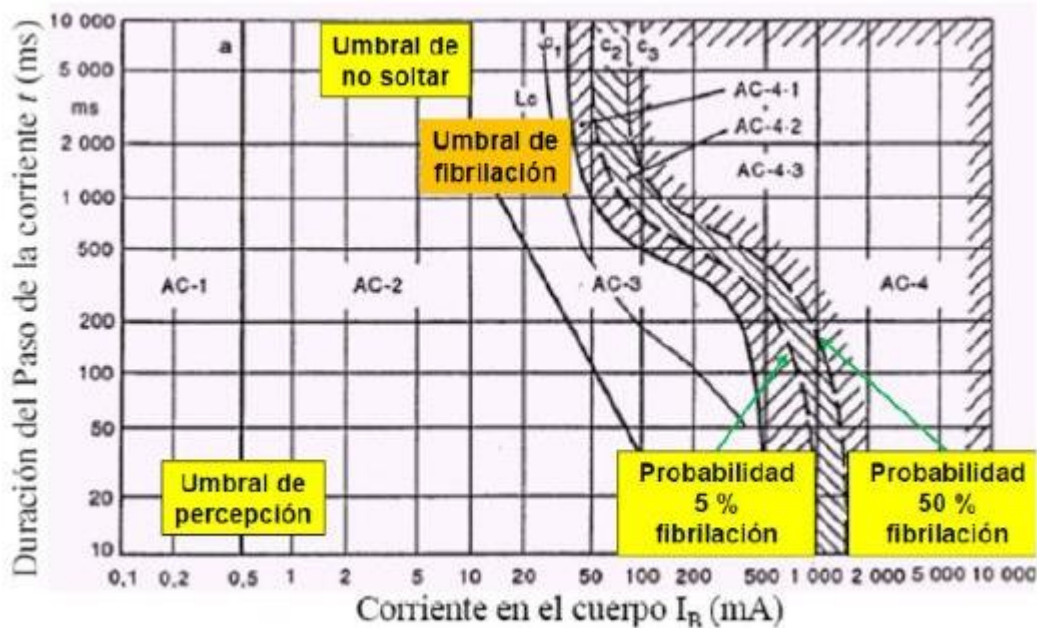


Figura 6.2: Efectos de la corriente alterna sobre el cuerpo humano.

Tensión de Paso Admisibile.

Con los datos anteriores se procede al cálculo:

$$E_{S50kg} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

Para

$$C_s = 1$$

$$t_s = 0,5[s]$$



$$E_{S50kg} = 466,81[V]$$

Y considerando un recubrimiento:

$$C_S = 0,72$$

$$t_s = 0,5[s]$$

$$E_{S50kg} = 2294,47[V]$$

Tensión de Contacto Admisible.

$$E_{T50kg} = (1000 + 1,5C_S\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

Para

$$C_S = 1$$

$$t_s = 0,5[s]$$

$$E_{T50kg} = 239,74[V]$$

Y considerando un recubrimiento:

$$C_S = 0,72$$

$$t_s = 0,5[s]$$

$$E_{T50kg} = 696,65[V]$$

1.4. Profundidad de Enterramiento del TC1206.

Es sabido que la mayor resistencia al sistema de puesta a tierra es ofrecida por las capas superficiales del terreno donde este sistema se emplaza

La resistencia del suelo varía inversamente con la sección y por lo tanto la resistividad del suelo es un factor preponderante en las primeras capas que se encuentran alrededor del electrodo.



Asimismo a mayor profundidad existe más garantía de la permanencia de las condiciones eléctricas y se independiza al sistema de las variaciones climáticas estacionales.

Mediciones efectuadas muestran que el 90% de la resistencia eléctrica de los suelos se encuentra en un radio comprendido entre 1,5 a 3 [m] del electrodo.

En lo que respecta a profundidad de enterramiento el TC1206 indica:

“La malla se ubicara en un plano horizontal situado como mínimo a 500 [mm] por debajo de la superficie del terreno”

La profundidad adoptada resulta un factor influyente para el cálculo de la resistencia de PAT y para las tensiones máximas de paso y de contacto.

Si bien el caso considerado por la AEA “Tratamiento de neutro y puesta a tierra” no es exactamente el caso del TC1206 cabe mencionar que dicha fuente recomienda que los conductores de la malla deben ubicarse preferentemente debajo del equipo a proteger y a una profundidad que oscila entre 0,6 [m] y 0,8[m]. Mientras que para las subestaciones rurales la profundidad exigida es 0,8 [m].

SPT Rurales (Subestaciones Monoposte).

$$E_m = 107,30 [V] < 239,74 [V] \text{ Verifica}$$

Con el agregado de un recubrimiento de hormigón, grava u otro tipo de material de alta resistividad se logra disminuir la tensión máxima de contacto.

Por otro lado la tensión de paso máxima resulta ser menor que la admisible, aun para suelos sin recubrimientos superficiales:

$$E_s = 67,28 [V] < 466,81 [V] \text{ Verifica}$$

El cálculo de ambas tensiones de detalla en el anexo “Memoria de cálculo de tensiones de paso y de contacto del TC1206”.

SPT Urbanos (Subestaciones Biposte).

$$E_m = 56,697 [V] < 239,74 [V] \text{ Verifica}$$



Esta tensión máxima de contacto resulta menor que la admisible aun para suelos sin recubrimientos superficiales.

Por otro lado la tensión de paso máxima también resulta ser menor que la admisible, aun para suelos sin recubrimientos superficiales:

$$E_S = 35,31 [V] < 466,81 [V] \text{ Verifica}$$

1.5. Resistencia del TC1206.

Como se explicó en el capítulo 2 el loess contiene típicamente un valor de humedad de entre el 8% y el 20%.

En el presente trabajo, se determinó sin embargo que el entorno de trabajo contiene una humedad del 7,56% (capítulo 4, inciso 2.4), valor que no está dentro de los valores típicos.

El porcentaje de humedad y la temperatura, como ya se detalló en el capítulo 2, son factores influyentes sobre la resistividad y por tanto también sobre la resistencia de puesta a tierra.

Al verificar que los cálculos teóricos realizados en el capítulo anterior, tienen una exactitud aceptable en comparación con los valores de resistencia de puesta a tierra medidos, comenzamos a estudiar el comportamiento resistivo de los electrodos bajo estudio utilizando estas teorías de cálculo con valores de resistividad representativos del tipo de suelo bajo estudio y no con el valor medido anteriormente que no es un valor típico, debido a que como ya se explicó, el porcentaje de humedad reinante dentro del entorno de trabajo no condice con los valores que típicamente contiene el loess.

Para los siguientes cálculos de resistencia de puesta a tierra se consideraran:

- *Compactación del suelo: 18,83 [kN/m³] que representa el 91,51 % de la máxima obtenida en el ensayo Proctor.*
- *Humedad del suelo: 14,68 [%].*
- *Escala: [1:20].*
- *Resistividad promedio adoptada: $\rho_a = 307,6 [\Omega.m]$.*



Resistencia del SPT tipo Rural.

Utilizando los datos del inciso anterior que se presumen como valores típicos del suelo loésico, se realizaron nuevos cálculos teóricos para determinar el valor de resistencia de puesta a tierra de los SPT.

En la siguiente tabla 6.2 se pueden ver los resultados obtenidos aplicando las distintas teorías de cálculo, y conociendo el error asociado a cada una de estas teorías, se calcula también el valor real que se tendría en una medición.

	Teórico [Ω]	Error esperado	Valor real presunto [Ω]
Método Cilindro esfera	104,132	-10,45%	115,018
Método Elipse	106,053	-8,80%	115,388
Método corriente a lo largo de un electrodo	107,526	-7,54%	115,629
Método AEA 90364-7-771, (2006)	105,268	-9,48%	115,244
Método Arcioni	104,147	-10,44%	115,021
Método IEEE Std. 80-2000	105,268	-9,48%	115,244

Tabla 6.2: Valores de RPaT del SPT utilizado en zonas rurales para valores típicos de resistividad del loess.

Recordemos lo que dice el TC1206 en cuanto a la resistencia de puesta a tierra:

“La resistencia de puesta a tierra será de 5 [Ω] como máximo. Cuando no se lograra este valor o los prescritos en los planos o especificaciones técnicas correspondientes con una sola jabalina, se instalara otra adicional según lo indicado en los dibujos. Las jabalinas estarán en el eje que pasa por el centro de ambos postes de una estructura biposte e el eje que pasa por el centro de una estructura monoposte y paralelo al cordon de la vereda, la línea de edificación o el eje de la calle o camino adyacente. Otras jabalinas se instalaran sobre el mismo eje”

Como se puede apreciar los valores obtenidos se encuentran alrededor de los 110 [Ω], valor que está muy alejado de los 5 [Ω] que pide como máximo el TC1206.

Dado el caso, y como se indica, se agrega una segunda jabalina y se realizan nuevamente los cálculos teóricos, utilizando esta vez solo el método de la IEEE, dado que es el único que contempla electrodos con más de una jabalina.



	Teórico [Ω]	Error esperado	Valor real presunto [Ω]
Método IEEE Std. 80-2000	93,265	-9,48%	102,103

Tabla 6.3: Valores de RPaT del SPT utilizado en zonas rurales para valores típicos de resistividad del loess con jabalina extra.

Resistencia del SPT tipo Urbano.

De la misma manera que en el inciso anterior, se calcula la resistencia del electrodo utilizando un valor típico de resistividad del loess, teniendo en cuenta que para este caso la AEA exige resistencias menores a los 10 [Ω] y no a los 5 [Ω] como en el caso de los SPT para zonas rurales.

Luego se repetirán los cálculos considerando una jabalina adicional.

	Teórico [Ω]	Error esperado	Valor real presunto [Ω]
Método Cilindro esfera	57,499	-1,11%	58,137
Método Elipse	57,750	-0,68%	58,142
Método corriente a lo largo de un electrodo	57,942	-0,35%	58,144
Método AEA 90364-7-771, (2006)	57,647	-0,85%	58,140
Método Arcioni	57,501	-1,11%	58,137
Método IEEE Std. 80-2000	57,647	-0,85%	58,140

Tabla 6.4: Valores de RPaT del SPT utilizado en zona urbana para valores típicos de resistividad del loess.

	Teórico [Ω]	Error esperado	Valor real presunto [Ω]
Método IEEE Std. 80-2000	55,456	-0,85%	55,930

Tabla 6.5: Valores de RPaT del SPT utilizado en zonas urbanas para valores típicos de resistividad del loess considerando una jabalina extra.



Como se puede ver tanto para el SPT usado en subestaciones del tipo monoposte y como en su equivalente para subestaciones biposte, considerando una resistividad promedio del loess, los valores se encuentran bastante alejados al solicitado por la EPEC, (“5[Ω] como máximo”).

Para poder satisfacer este requisito, y tomando todos los parámetros dimensionales mínimos que solicita la EPEC, se calcula la resistividad del terreno necesaria. Tabla 6.6.

SPT Rural con Dos Jabalinas			
Teoría:	Teórico [Ω]	Error esperado	Valor real presunto[Ω]
Resistencia IEEE Std. 80-2000 [Ω]	4,567	-9,48%	5,000
Valor de resistividad [Ω.m]	15,061		
SPT Urbano con Dos Jabalinas			
Teoría:	Teórico [Ω]	Error	Valor real presunto[Ω]
Resistencia IEEE Std. 80-2000 [Ω]	4,958	-0,85%	5,000
Valor de resistividad [Ω.m]	27,5		

Tabla 6.6: Valores de resistividad del loess considerando una jabalina extra.



2. Conclusiones Finales sobre el TC1206.

La primera observación que cabe hacer sobre el tipo constructivo estudiado es que este no hace distinción alguna entre instalaciones rurales y urbanas, ni para las distintas zonas de la provincia de Córdoba según sus características geotécnicas. Como existen zonas de suelos de alta resistividad, alcanzar la resistencia exigida por las normativas en dichas zonas resulta impracticable con el SPT propuesto.

No obstante alcanzar estos valores de resistencia de puesta a tierra no resulta tan importante, como si lo es alcanzar valores seguros de tensiones de paso y de contacto.

Para lograr tensiones seguras se recomienda buscar alcanzar la equipotencialidad en zonas rurales, donde pueden no existir aislamientos superficiales, para ello es importante cuidar siempre que el borde del lazo del SPT no se aleje más de un metro de la estructura puesta a tierra.

En zonas urbanas donde si existen revestimientos superficiales aislantes se recomienda por otro lado buscar alcanzar una buena aislación.

En cuanto a las dimensiones mínimas especificadas por el TC1206 hay que señalar que estas resultan impracticables, debido a que no tienen en consideración las dimensiones de los bloques de fundación de los postes que soportan la subestación.

Así mismo se deberían especificar también las dimensiones máximas del lazo perimetral, para evitar falta de equipotencialidad y valores peligrosos de tensión de contacto.

Luego, en cuanto a la corriente de falla la AEA explica que con resistencias de puesta a tierra del orden de los $10[\Omega]$, en un sistema de $13,2 [kV]$, la corriente de falla será próxima a los $800[A]$. Sin embargo muchas veces la corriente de falla será superior a este valor, aspecto sobre el cual tampoco se hace mención en el TC1206.

Por último y antes de abordar las diferencias entre los sistemas urbanos y los sistemas rurales, diremos que resulta imprescindible que el TC1206 exija estudios de tensiones de contacto y de paso, puesto que son cuestiones inherentes a la seguridad de las personas que hasta la fecha no están siendo tenidas en cuenta.

2.1. TC1206 tipo Urbano.

Las observaciones realizadas sobre el TC1206 para cumplir con la función de protección del sistema, protección a las personas, y como referencia del sistema en zonas urbanas son las siguientes:

- No cumple con la resistencia de puesta a tierra $R < 10[\Omega]$.
- Las jabalinas exigidas resultan más cortas que las indicadas por la AEA $l < 2[m]$.



- La sección mínima del conductor de la malla no cumple con la sección mínima pedida por la AEA $S < 35 [mm^2]$.
- No se exige una memoria de cálculo que verifique los valores máximos de tensiones de paso y de contacto.

2.2. TC1206 tipo Rural.

Las observaciones realizadas sobre el TC1206 para cumplir con la función de protección del sistema, protección a las personas, y como referencia del sistema en zonas rurales son las siguientes:

- La distancia mínima indicada por el TC1206 no contempla el solapamiento entre jabalinas, debido a que la distancia entre ellas resulta menor a dos veces el largo de una jabalina.
- Las jabalinas exigidas resultan más cortas que las indicadas por la AEA $l < 2 [m]$.
- No cumple con la resistencia de puesta a tierra $R < 5 [\Omega]$ pedido por la AEA para subestaciones rurales.
- No se exige una memoria de cálculo que verifique los valores máximos de tensiones de paso y de contacto.
- No se exige el uso de señalizaciones de peligro o precaución pedida por la AEA.
- La sección mínima del conductor de la malla no cumple con la sección mínima pedida por la AEA $S < 35 [mm^2]$.
- No exige recubrimientos superficiales de hormigón, grava u otro material útil para disminuir los riesgos de shock por tensiones de paso y de contacto.

3. Conclusiones Finales sobre los Métodos de Medición Utilizados.

3.1. Medición de Resistividad. Calicata Eléctrica.

Con este método de medición se realizó una tomografía geoelectrica del entorno de trabajo, como se vio en el capítulo 4, dicho estudio no arrojó con claridad y certeza los sitios donde se encontraban las interferencias colocadas.

Esto pudo deberse principalmente a la distancia interelectrodica tomada para efectuar las mediciones, ya que dicha distancia es la que define la resolución de la medición y no resulto ser adecuada para las dimensiones de las interferencias colocadas.

Para estudios posteriores se recomienda tomar distancias interelectrodicas menores a los cinco centímetros utilizados en el presente trabajo para lograr mayor resolución en la



medición y poder detectar con la calicata eléctrica los objetos ya enterrados en el entorno de trabajo.

3.2. Medición de Resistencia. Método de la Caída de Potencial.

El método escogido para realizar las mediciones de resistencia de puesta a tierra resulto satisfactorio, colocando los electrodos auxiliares en cuadratura como recomienda la norma IEEE Std. 81.2, (1991) de esta forma las mediciones no se vieron afectadas por los objetos metálicos cercanos al SPT, y no se evidenciaron interferencias de ningún otro tipo.

En cuanto a los resultados teóricos obtenidos utilizando las distintas teorías de cálculo se observa que fueron concordantes con la medición realizada.

Se observó también en las tablas 5.3 y 5.4 del capítulo anterior que las diferencias existentes entre los resultados obtenidos con las distintas teorías aplicadas son irrelevantes y se concluye por lo tanto que todas estas teorías logran describir de manera aceptable el comportamiento de los electrodos bajo estudio.

4. Recomendaciones para Estudios Futuros.

Para la realización de futuros trabajos que tengan por objeto estudiar el comportamiento de los SPT utilizados en zonas urbanas para aterrizar las subestaciones transformadoras se recomienda tener en cuenta la interconexión de los sistemas locales de puesta a tierra, que por su proximidad conforman un sistema de puesta a tierra equivalente conocido como **Sistema de Puesta a Tierra Global** (AEA "Tratamiento de neutro y puesta a tierra", Modulo 6, (2012))

Tales sistemas permiten la división de corrientes de defecto a tierra de forma que resulta en una reducción de la subida de potencial de tierra del sistema local.

Esto es natural en zonas urbanas de alta densidad, donde las instalaciones de transformación MT/BT están próximas y sus puestas a tierra están interconectadas.

Por otro lado se recomienda realizar una evaluación criteriosa del valor óptimo de resistencia de puesta a tierra para el buen desempeño de un SPT, que como en este caso debe cumplir la función de protección del sistema y protección a las personas así como también servir de referencia para la red.

Otro análisis recomendable para estudios futuros son los fenómenos intempestivos característicos de las descargas atmosféricas.



ANEXO I:



“MEDICIÓN DE SALINIDAD”



Mediciones de Capacidad y Resistencia para Muestras Inalteradas.

Muestra N° 1												
Frecuencia [Hz]	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.m]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]
100	64,2420	0,0248	6,2992	503,936	47,0900	0,0338	6,9551	556,408	67,5340	0,0236	5,718	457,440
120	49,1120	0,0270	6,0985	487,880	36,6160	0,0362	6,8019	544,152	51,4620	0,0258	5,573	445,864
1000	2,2580	0,0705	5,2227	417,816	1,6771	0,0949	6,0337	482,696	2,1150	0,0753	4,892	391,328
10000	0,1145	0,1390	4,9221	393,768	0,0928	0,1714	5,717	457,360	0,1081	0,1472	4,654	372,320

Muestra N° 3												
Frecuencia [Hz]	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.m]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]
100	2235,40	0,0007	0,4681	37,447	2124,20	0,0007	0,4919	39,350	2482,80	0,0006	0,4595	36,761
120	1893,90	0,0007	0,4413	35,307	1800,30	0,0007	0,4714	37,710	2198,40	0,0006	0,4066	32,530
1000	142,29	0,0011	0,2500	19,996	143,70	0,0011	0,2611	20,886	210,2800	0,0008	0,2171	17,366
10000	3,4460	0,0046	0,2204	17,635	3,4951	0,0046	0,2277	18,212	5,3591	0,0030	0,1822	14,572

Muestra N° 2												
Frecuencia [Hz]	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.m]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]
100	1096,70	0,0015	0,8811	70,485	1138,70	0,0014	1,0828	86,624	1375,50	0,0012	0,774	61,898
120	927,50	0,0014	0,8180	65,440	969,20	0,0014	0,9637	77,096	1170,70	0,0011	0,711	56,862
1000	63,8740	0,0025	0,4870	38,958	84,7300	0,0019	0,4891	39,128	85,6740	0,0019	0,400	32,016
10000	1,6264	0,0098	0,4358	34,860	2,1670	0,0073	0,4193	33,544	2,0750	0,0077	0,356	28,482



Muestra N° 4												
Frecuencia [Hz]	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.m]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]	C [nF]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	ρ [Ω.n]
100	2726,40	0,0006	0,4437	35,494	2033,80	0,0008	0,56901	45,521	2784,90	0,0006	0,4421	35,370
120	2387,00	0,0006	0,4200	33,598	1779,80	0,0007	0,53227	42,582	2395,60	0,0006	0,4220	33,761
1000	310,55	0,0005	0,1994	15,950	237,62	0,0007	0,27143	21,714	302,480	0,0005	0,1918	15,346
10000	8,7483	0,0018	0,1515	12,119	7,2549	0,0022	0,20301	16,241	7,8778	0,0020	0,1500	11,998

NOTA:

- Valores en naranja solo indican que el instrumento SR715 indicó valores en μF y luego fueron llevados a nF.
- Valores en verde solo indican que el instrumento SR715 indicó valores en pF y luego fueron llevados a nF.

Calculo de Impedancia de las Muestras según su Frecuencia.

100 Hz	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
% salinidad	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]
0,10%	0,0248	6,2992	6,3240	503,936	0,0338	6,9551	6,9889	556,408	0,0236	5,718	5,7416	457,44
0,37%	0,0015	0,88106	0,8825	70,4848	0,0014	1,0828	1,0842	86,624	0,0012	0,77373	0,7749	61,8984
0,78%	0,0007	0,46809	0,4688	37,4472	0,0007	0,49188	0,4926	39,3504	0,0006	0,45951	0,4602	36,7608
1,08%	0,0006	0,44367	0,4443	35,4936	0,0008	0,56901	0,5698	45,5208	0,0006	0,44213	0,4427	35,3704

120 Hz	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
% salinidad	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]
0,10%	0,0270	6,0985	6,1255	487,88	0,0362	6,8019	6,8381	544,152	0,0258	5,5733	5,5991	445,864
0,37%	0,0014	0,818	0,8194	65,44	0,0014	0,9637	0,9651	77,096	0,0011	0,71078	0,7119	56,8624
0,78%	0,0007	0,44134	0,4420	35,3072	0,0007	0,47138	0,4721	37,7104	0,0006	0,40663	0,4072	32,5304
1,08%	0,0006	0,41997	0,4205	33,5976	0,0007	0,53227	0,5330	42,5816	0,0006	0,42201	0,4226	33,7608

1 kHz	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
% salinidad	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]
0,10%	0,0705	5,2227	5,2932	417,816	0,0949	6,0337	6,1286	482,696	0,0753	4,8916	4,9669	391,328
0,37%	0,0025	0,48698	0,4895	38,9584	0,0019	0,4891	0,4910	39,128	0,0019	0,4002	0,4021	32,016
0,78%	0,0011	0,24995	0,2511	19,996	0,0011	0,26108	0,2622	20,8864	0,0008	0,21708	0,2178	17,3664
1,08%	0,0005	0,19938	0,1999	15,9504	0,0007	0,27143	0,2721	21,7144	0,0005	0,19183	0,1924	15,3464

10 kHz	Dirección Z				Dirección Y				Dirección X			
% salinidad	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]	Xc [kΩ]	R [kΩ]	Z [kΩ]	ρ [Ω.m]
0,10%	0,1390	4,9221	5,0611	393,768	0,1714	5,717	5,8884	457,36	0,1472	4,654	4,8012	372,32
0,37%	0,0098	0,43575	0,4455	34,86	0,0073	0,4193	0,4266	33,544	0,0077	0,35602	0,3637	28,4816
0,78%	0,0046	0,22044	0,2251	17,6352	0,0046	0,22765	0,2322	18,212	0,0030	0,18215	0,1851	14,572
1,08%	0,0018	0,15149	0,1533	12,1192	0,0022	0,20301	0,2052	16,2408	0,0020	0,14997	0,1520	11,9976



ANEXO II:



“MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD. CALICATA”



Mediciones de Resistividad. Calicata.

En el presente anexo se muestran los resultados de las mediciones realizadas por el método de la calicata eléctrica con la finalidad de utilizarlos en el Software y así visualizar la distribución de resistividad en el entorno de trabajo. Se enlistan así, y tal como se mencionó en el capítulo 4, los cinco perfiles de medición. A su vez se muestran perfiles de valores escalados (modelo) y no escalados (reales).

Valores SPT modelo:

Perfil 1:

N°	Secuencia	Perfil 1					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	Resistividad
1	1-2-3-4	3,0950	14,724	0,05	0,314	210,201	66,037
	2-3-4-5	2,4140	15,201	0,05	0,314	158,805	49,890
	3-4-5-6	3,4450	15,515	0,05	0,314	222,043	69,757
	4-5-6-7	2,7160	15,039	0,05	0,314	180,597	56,736
	5-6-7-8	2,1540	15,759	0,05	0,314	136,684	42,940
	6-7-8-9	2,5140	16,150	0,05	0,314	155,666	48,904
	7-8-9-10	1,7798	16,144	0,05	0,314	110,245	34,635
	8-9-10-11	2,0277	14,381	0,05	0,314	140,999	44,296
	9-10-11-12	1,7283	15,301	0,05	0,314	112,953	35,485
	10-11-12-13	1,7890	15,850	0,05	0,314	112,871	35,459
	11-12-13-14	1,9400	15,497	0,05	0,314	125,186	39,328
	12-13-14-15	1,8059	14,920	0,05	0,314	121,039	38,025
	13-14-15-16	2,1394	15,983	0,05	0,314	133,855	42,052
	14-15-16-17	2,2510	15,504	0,05	0,314	145,188	45,612
	15-16-17-18	2,7331	15,264	0,05	0,314	179,055	56,252
	16-17-18-19	3,0860	14,584	0,05	0,314	211,602	66,477
	17-18-19-20	2,3571	8,774	0,05	0,314	268,646	84,398
2	1-3-5-7	1,7073	15,326	0,10	0,628	111,399	69,994
	2-4-6-8	1,5179	15,820	0,10	0,628	95,948	60,286
	3-5-7-9	1,4698	15,295	0,10	0,628	96,097	60,379
	4-6-8-10	1,3872	15,586	0,10	0,628	89,003	55,922
	5-7-9-11	1,3828	15,290	0,10	0,628	90,438	56,824
	6-8-10-12	1,3165	15,106	0,10	0,628	87,151	54,758
	7-9-11-13	1,2317	16,158	0,10	0,628	76,228	47,896
	8-10-12-14	1,0502	15,107	0,10	0,628	69,517	43,679



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	9-11-13-15	1,0321	15,338	0,10	0,628	67,290	42,280
	10-12-14-16	1,1312	15,083	0,10	0,628	74,998	47,123
	11-13-15-17	1,2479	15,566	0,10	0,628	80,168	50,371
	12-14-16-18	1,3324	14,830	0,10	0,628	89,845	56,451
	13-15-17-19	1,4524	15,569	0,10	0,628	93,288	58,614
	14-16-18-20	1,4915	13,952	0,10	0,628	106,902	67,169
3	1-4-7-10	0,9232	15,195	0,15	0,942	60,757	57,262
	2-5-8-11	0,8688	16,545	0,15	0,942	52,511	49,491
	3-6-9-12	0,9100	15,432	0,15	0,942	58,968	55,576
	4-7-10-13	0,9218	14,874	0,15	0,942	61,974	58,409
	5-8-11-14	0,9113	15,594	0,15	0,942	58,439	55,078
	6-9-12-15	0,8429	15,751	0,15	0,942	53,514	50,436
	7-10-13-16	0,7445	15,688	0,15	0,942	47,457	44,727
	8-11-14-17	0,7527	15,291	0,15	0,942	49,225	46,393
	9-12-15-18	0,8312	15,298	0,15	0,942	54,334	51,208
	10-13-16-19	0,8660	15,212	0,15	0,942	56,929	53,654
	11-14-17-20	0,2714	4,318	0,15	0,942	62,860	59,244
4	1-5-9-13	0,6857	16,172	0,20	1,257	42,400	53,282
	2-6-10-14	0,6097	15,949	0,20	1,257	38,228	48,039
	3-7-11-15	0,6488	15,266	0,20	1,257	42,500	53,407
	4-8-12-16	0,6315	15,341	0,20	1,257	41,164	51,728
	5-9-13-17	0,6215	15,006	0,20	1,257	41,417	52,046
	6-10-14-18	0,5907	15,153	0,20	1,257	38,982	48,987
	7-11-15-19	0,5682	14,688	0,20	1,257	38,685	48,613
	8-12-16-20	0,2065	4,082	0,20	1,257	50,590	63,574
5	1-6-11-16	0,4902	15,169	0,25	1,571	32,316	50,762
	2-7-12-17	0,4307	13,772	0,25	1,571	31,274	49,124
	3-8-13-18	0,5223	16,296	0,25	1,571	32,051	50,345
	4-9-14-19	0,2500	8,234	0,25	1,571	30,362	47,692
	5-10-15-20	0,1088	2,868	0,25	1,571	37,939	59,595
6	1-7-13-19	0,1399	4,623	0,30	1,885	30,251	57,022
	2-8-14-20	0,0960	2,998	0,30	1,885	32,028	60,371



Perfil 2:

N°	Secuencia	Perfil 2						
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad	
1	1-2-3-4	2,8050	13,977	0,05	0,314	200,687	63,048	
	2-3-4-5	2,1756	15,196	0,05	0,314	143,169	44,978	
	3-4-5-6	2,2540	14,198	0,05	0,314	158,755	49,874	
	4-5-6-7	2,8390	16,643	0,05	0,314	170,582	53,590	
	5-6-7-8	1,3082	10,395	0,05	0,314	125,849	39,537	
	6-7-8-9	1,5705	14,287	0,05	0,314	109,925	34,534	
	7-8-9-10	2,0663	15,176	0,05	0,314	136,156	42,775	
	8-9-10-11	2,2361	14,961	0,05	0,314	149,462	46,955	
	9-10-11-12	3,0216	15,963	0,05	0,314	189,288	59,466	
	10-11-12-13	2,3844	15,323	0,05	0,314	155,609	48,886	
	11-12-13-14	2,2198	14,723	0,05	0,314	150,771	47,366	
	12-13-14-15	2,2007	15,968	0,05	0,314	137,819	43,297	
	13-14-15-16	0,4640	2,612	0,05	0,314	177,669	55,816	
	14-15-16-17	1,8744	14,640	0,05	0,314	128,033	40,223	
	15-16-17-18	3,6970	15,688	0,05	0,314	235,658	74,034	
	16-17-18-19	0,2192	1,463	0,05	0,314	149,805	47,063	
	17-18-19-20	2,4392	15,897	0,05	0,314	153,438	48,204	
	2	1-3-5-7	0,9706	15,071	0,10	0,628	64,402	40,465
		2-4-6-8	1,1761	14,728	0,10	0,628	79,855	50,174
		3-5-7-9	0,4867	5,635	0,10	0,628	86,371	54,268
4-6-8-10		0,8974	14,083	0,10	0,628	63,722	40,038	
5-7-9-11		0,3082	5,636	0,10	0,628	54,684	34,359	
6-8-10-12		0,7805	10,311	0,10	0,628	75,696	47,561	
7-9-11-13		1,3833	15,484	0,10	0,628	89,337	56,132	
8-10-12-14		1,2512	14,836	0,10	0,628	84,335	52,989	
9-11-13-15		0,9578	15,942	0,10	0,628	60,080	37,750	
10-12-14-16		0,3628	4,649	0,10	0,628	78,038	49,033	
11-13-15-17		1,1270	14,553	0,10	0,628	77,441	48,658	
12-14-16-18		1,1039	14,509	0,10	0,628	76,084	47,805	
13-15-17-19		1,4829	15,249	0,10	0,628	97,246	61,101	
14-16-18-20	1,3355	15,899	0,10	0,628	83,999	52,778		
3	1-4-7-10	0,6527	13,620	0,15	0,942	47,922	45,166	
	2-5-8-11	0,6393	16,353	0,15	0,942	39,094	36,845	
	3-6-9-12	0,1691	2,468	0,15	0,942	68,509	64,568	
	4-7-10-13	0,5042	13,052	0,15	0,942	38,630	36,408	
	5-8-11-14	0,6339	12,967	0,15	0,942	48,886	46,074	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,7801	15,031	0,15	0,942	51,899	48,914
	7-10-13-16	0,1786	3,660	0,15	0,942	48,787	45,981
	8-11-14-17	0,5045	14,952	0,15	0,942	33,741	31,800
	9-12-15-18	0,6632	18,482	0,15	0,942	35,884	33,819
	10-13-16-19	0,6443	14,320	0,15	0,942	44,993	42,405
	11-14-17-20	0,9435	16,323	0,15	0,942	57,802	54,477
4	1-5-9-13	0,3622	13,689	0,20	1,257	26,459	33,250
	2-6-10-14	0,3828	15,318	0,20	1,257	24,990	31,404
	3-7-11-15	0,1678	3,200	0,20	1,257	52,447	65,907
	4-8-12-16	0,1394	4,225	0,20	1,257	32,989	41,456
	5-9-13-17	0,2527	8,912	0,20	1,257	28,355	35,632
	6-10-14-18	0,4823	16,083	0,20	1,257	29,988	37,684
	7-11-15-19	0,4922	17,498	0,20	1,257	28,129	35,348
	8-12-16-20	0,4028	16,824	0,20	1,257	23,942	30,086
5	1-6-11-16	0,0556	1,182	0,25	1,571	47,080	73,953
	2-7-12-17	0,3133	14,868	0,25	1,571	21,072	33,100
	3-8-13-18	0,0833	3,453	0,25	1,571	24,121	37,889
	4-9-14-19	0,4101	17,501	0,25	1,571	23,433	36,808
	5-10-15-20	0,3524	14,825	0,25	1,571	23,771	37,339
6	1-7-13-19	0,2652	13,560	0,30	1,885	19,556	36,862
	2-8-14-20	0,3045	15,528	0,30	1,885	19,610	36,963



Perfil 3:

N°	Secuencia	Perfil 3					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	1,4421	15,220	0,05	0,314	94,750	29,767
	2-3-4-5	1,5869	15,952	0,05	0,314	99,480	31,252
	3-4-5-6	1,2965	15,521	0,05	0,314	83,532	26,242
	4-5-6-7	1,1455	14,470	0,05	0,314	79,164	24,870
	5-6-7-8	1,0901	14,297	0,05	0,314	76,247	23,954
	6-7-8-9	1,4216	15,874	0,05	0,314	89,555	28,135
	7-8-9-10	1,1101	14,053	0,05	0,314	78,994	24,817
	8-9-10-11	1,3225	14,859	0,05	0,314	89,003	27,961
	9-10-11-12	1,4869	14,218	0,05	0,314	104,579	32,854
	10-11-12-13	1,2103	14,053	0,05	0,314	86,124	27,057
	11-12-13-14	1,0743	11,806	0,05	0,314	90,996	28,587
	12-13-14-15	1,7456	15,887	0,05	0,314	109,876	34,519
	13-14-15-16	1,4236	14,771	0,05	0,314	96,378	30,278
	14-15-16-17	0,2279	1,678	0,05	0,314	135,800	42,663
	15-16-17-18	1,6870	15,832	0,05	0,314	106,556	33,476
	16-17-18-19	1,3539	15,592	0,05	0,314	86,833	27,279
	17-18-19-20	1,4825	15,059	0,05	0,314	98,446	30,928
2	1-3-5-7	0,8994	16,662	0,10	0,628	53,979	33,916
	2-4-6-8	0,6797	15,221	0,10	0,628	44,655	28,058
	3-5-7-9	0,6749	14,644	0,10	0,628	46,087	28,957
	4-6-8-10	0,7709	14,754	0,10	0,628	52,250	32,830
	5-7-9-11	0,7530	16,488	0,10	0,628	45,670	28,695
	6-8-10-12	0,6452	14,900	0,10	0,628	43,302	27,207
	7-9-11-13	0,8050	16,055	0,10	0,628	50,140	31,504
	8-10-12-14	0,1367	1,494	0,10	0,628	91,488	57,484
	9-11-13-15	0,6774	15,375	0,10	0,628	44,059	27,683
	10-12-14-16	0,7801	14,867	0,10	0,628	52,472	32,969
	11-13-15-17	0,9352	16,145	0,10	0,628	57,925	36,395
	12-14-16-18	0,8692	16,974	0,10	0,628	51,208	32,175
	13-15-17-19	0,7515	15,805	0,10	0,628	47,548	29,875
14-16-18-20	0,1039	2,082	0,10	0,628	49,904	31,356	
3	1-4-7-10	0,5986	17,997	0,15	0,942	33,261	31,348
	2-5-8-11	0,5268	15,965	0,15	0,942	32,997	31,099
	3-6-9-12	0,4946	15,803	0,15	0,942	31,298	29,498
	4-7-10-13	0,4947	16,013	0,15	0,942	30,894	29,117
	5-8-11-14	0,1186	3,235	0,15	0,942	36,655	34,547



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,4499	15,171	0,15	0,942	29,655	27,949
	7-10-13-16	0,4655	15,279	0,15	0,942	30,467	28,714
	8-11-14-17	0,4815	15,128	0,15	0,942	31,828	29,998
	9-12-15-18	0,5638	15,580	0,15	0,942	36,187	34,106
	10-13-16-19	0,5397	15,442	0,15	0,942	34,950	32,940
	11-14-17-20	0,5215	15,578	0,15	0,942	33,477	31,551
4	1-5-9-13	0,4304	17,456	0,20	1,257	24,656	30,984
	2-6-10-14	0,0729	2,310	0,20	1,257	31,543	39,638
	3-7-11-15	0,2265	9,652	0,20	1,257	23,471	29,494
	4-8-12-16	0,3699	16,579	0,20	1,257	22,311	28,037
	5-9-13-17	0,3613	15,807	0,20	1,257	22,857	28,723
	6-10-14-18	0,4065	16,175	0,20	1,257	25,131	31,581
	7-11-15-19	0,4090	15,286	0,20	1,257	26,757	33,623
	8-12-16-20	0,4005	16,063	0,20	1,257	24,933	31,332
5	1-6-11-16	0,3843	16,104	0,25	1,571	23,864	37,485
	2-7-12-17	0,3598	15,840	0,25	1,571	22,715	35,680
	3-8-13-18	0,3443	15,385	0,25	1,571	22,379	35,153
	4-9-14-19	0,3711	15,212	0,25	1,571	24,395	38,320
	5-10-15-20	0,3480	15,407	0,25	1,571	22,587	35,480
6	1-7-13-19	0,2833	15,126	0,30	1,885	18,726	35,298
	2-8-14-20	0,2899	15,096	0,30	1,885	19,204	36,198



Perfil 4:

N°	Secuencia	Perfil 3					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	1,5933	14,326	0,05	0,314	111,217	34,940
	2-3-4-5	1,4124	14,839	0,05	0,314	95,182	29,902
	3-4-5-6	1,3237	15,245	0,05	0,314	86,828	27,278
	4-5-6-7	2,1294	15,195	0,05	0,314	140,138	44,026
	5-6-7-8	0,8602	15,126	0,05	0,314	56,869	17,866
	6-7-8-9	1,4995	14,884	0,05	0,314	100,746	31,650
	7-8-9-10	1,2327	14,775	0,05	0,314	83,431	26,211
	8-9-10-11	1,2943	16,248	0,05	0,314	79,659	25,026
	9-10-11-12	1,5588	17,766	0,05	0,314	87,741	27,565
	10-11-12-13	1,3824	17,792	0,05	0,314	77,698	24,409
	11-12-13-14	1,5094	16,367	0,05	0,314	92,222	28,972
	12-13-14-15	1,4713	18,793	0,05	0,314	78,290	24,595
	13-14-15-16	1,7489	14,576	0,05	0,314	119,985	37,694
	14-15-16-17	1,4104	15,375	0,05	0,314	91,733	28,819
	15-16-17-18	1,6262	15,800	0,05	0,314	102,924	32,335
	16-17-18-19	1,7394	15,220	0,05	0,314	114,284	35,903
	17-18-19-20	1,7220	15,404	0,05	0,314	111,789	35,120
2	1-3-5-7	0,6867	15,045	0,10	0,628	45,643	28,678
	2-4-6-8	1,1883	16,098	0,10	0,628	73,817	46,380
	3-5-7-9	1,0250	15,932	0,10	0,628	64,336	40,423
	4-6-8-10	0,5675	16,579	0,10	0,628	34,230	21,507
	5-7-9-11	0,5840	15,862	0,10	0,628	36,818	23,133
	6-8-10-12	0,5503	10,991	0,10	0,628	50,068	31,459
	7-9-11-13	0,8222	16,047	0,10	0,628	51,237	32,193
	8-10-12-14	0,8920	17,176	0,10	0,628	51,933	32,630
	9-11-13-15	0,7930	17,363	0,10	0,628	45,672	28,696
	10-12-14-16	0,7732	15,866	0,10	0,628	48,733	30,620
	11-13-15-17	0,9463	16,009	0,10	0,628	59,111	37,140
	12-14-16-18	0,9711	17,663	0,10	0,628	54,979	34,545
	13-15-17-19	0,7678	16,750	0,10	0,628	45,839	28,801
14-16-18-20	0,9106	16,269	0,10	0,628	55,971	35,168	
3	1-4-7-10	0,6311	15,442	0,15	0,942	40,869	38,518
	2-5-8-11	0,6362	16,798	0,15	0,942	37,874	35,695
	3-6-9-12	0,4264	17,088	0,15	0,942	24,953	23,518
	4-7-10-13	0,4267	15,667	0,15	0,942	27,236	25,669
	5-8-11-14	0,5175	17,001	0,15	0,942	30,439	28,688



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,4868	12,889	0,15	0,942	37,769	35,596
	7-10-13-16	0,7827	16,524	0,15	0,942	47,367	44,643
	8-11-14-17	0,5938	17,797	0,15	0,942	33,365	31,446
	9-12-15-18	0,5524	15,411	0,15	0,942	35,845	33,783
	10-13-16-19	0,6480	19,204	0,15	0,942	33,743	31,802
	11-14-17-20	0,5620	15,776	0,15	0,942	35,624	33,575
4	1-5-9-13	0,5215	19,523	0,20	1,257	26,712	33,567
	2-6-10-14	0,3582	16,055	0,20	1,257	22,311	28,037
	3-7-11-15	0,4515	18,797	0,20	1,257	24,020	30,184
	4-8-12-16	0,3798	16,365	0,20	1,257	23,208	29,164
	5-9-13-17	0,3821	15,503	0,20	1,257	24,647	30,972
	6-10-14-18	0,4075	14,849	0,20	1,257	27,443	34,486
	7-11-15-19	0,4715	16,702	0,20	1,257	28,230	35,475
	8-12-16-20	0,4572	17,549	0,20	1,257	26,053	32,739
5	1-6-11-16	0,2928	15,407	0,25	1,571	19,005	29,853
	2-7-12-17	0,4488	15,839	0,25	1,571	28,335	44,509
	3-8-13-18	0,3074	14,463	0,25	1,571	21,256	33,388
	4-9-14-19	0,3958	18,352	0,25	1,571	21,567	33,878
	5-10-15-20	0,3533	14,909	0,25	1,571	23,697	37,223
6	1-7-13-19	0,4857	18,140	0,30	1,885	26,775	50,470
	2-8-14-20	0,4133	15,069	0,30	1,885	27,427	51,699



Perfil 5:

N°	Secuencia	Perfil 3					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	2,5262	20,026	0,05	0,314	126,146	39,630
	2-3-4-5	2,3331	15,450	0,05	0,314	151,010	47,441
	3-4-5-6	2,2104	15,093	0,05	0,314	146,452	46,009
	4-5-6-7	2,1492	18,857	0,05	0,314	113,974	35,806
	5-6-7-8	1,8271	16,116	0,05	0,314	113,372	35,617
	6-7-8-9	1,7598	16,282	0,05	0,314	108,083	33,955
	7-8-9-10	0,4592	7,508	0,05	0,314	61,161	19,214
	8-9-10-11	1,8544	17,584	0,05	0,314	105,460	33,131
	9-10-11-12	1,5482	18,629	0,05	0,314	83,107	26,109
	10-11-12-13	1,1985	16,763	0,05	0,314	71,497	22,461
	11-12-13-14	1,7690	16,640	0,05	0,314	106,310	33,398
	12-13-14-15	1,6392	15,772	0,05	0,314	103,931	32,651
	13-14-15-16	1,5879	15,279	0,05	0,314	103,927	32,650
	14-15-16-17	2,8419	16,419	0,05	0,314	173,086	54,377
	15-16-17-18	0,9465	9,188	0,05	0,314	103,015	32,363
	16-17-18-19	3,2230	19,136	0,05	0,314	168,426	52,913
	17-18-19-20	3,0779	17,193	0,05	0,314	179,021	56,241
2	1-3-5-7	1,3292	15,662	0,10	0,628	84,868	53,324
	2-4-6-8	0,4799	16,317	0,10	0,628	29,411	18,479
	3-5-7-9	0,5544	16,078	0,10	0,628	34,482	21,666
	4-6-8-10	0,8562	16,084	0,10	0,628	53,233	33,447
	5-7-9-11	0,7600	15,585	0,10	0,628	48,765	30,640
	6-8-10-12	0,8732	17,848	0,10	0,628	48,924	30,740
	7-9-11-13	1,0431	15,331	0,10	0,628	68,039	42,750
	8-10-12-14	0,9397	16,307	0,10	0,628	57,626	36,207
	9-11-13-15	0,9367	16,307	0,10	0,628	57,442	36,092
	10-12-14-16	0,9362	18,244	0,10	0,628	51,316	32,242
	11-13-15-17	1,0798	15,882	0,10	0,628	67,989	42,719
	12-14-16-18	0,3331	2,119	0,10	0,628	157,175	98,756
	13-15-17-19	0,3587	5,531	0,10	0,628	64,853	40,748
14-16-18-20	1,3163	18,336	0,10	0,628	71,788	45,106	
3	1-4-7-10	0,4796	14,287	0,15	0,942	33,569	31,638
	2-5-8-11	0,6591	16,023	0,15	0,942	41,135	38,768
	3-6-9-12	0,7590	19,899	0,15	0,942	38,143	35,949
	4-7-10-13	0,4202	16,102	0,15	0,942	26,096	24,595
	5-8-11-14	0,8024	18,047	0,15	0,942	44,462	41,904



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,7404	16,210	0,15	0,942	45,676	43,048
	7-10-13-16	0,7934	17,947	0,15	0,942	44,208	41,665
	8-11-14-17	0,6364	16,246	0,15	0,942	39,173	36,919
	9-12-15-18	0,2690	7,963	0,15	0,942	33,784	31,840
	10-13-16-19	0,3602	15,535	0,15	0,942	23,186	21,853
	11-14-17-20	0,3063	7,049	0,15	0,942	43,453	40,953
4	1-5-9-13	0,5655	18,071	0,20	1,257	31,293	39,324
	2-6-10-14	0,6084	16,733	0,20	1,257	36,359	45,690
	3-7-11-15	0,5619	16,933	0,20	1,257	33,183	41,699
	4-8-12-16	0,6434	19,276	0,20	1,257	33,378	41,944
	5-9-13-17	0,5869	15,426	0,20	1,257	38,046	47,810
	6-10-14-18	0,4334	13,712	0,20	1,257	31,607	39,719
	7-11-15-19	0,2176	6,915	0,20	1,257	31,461	39,535
	8-12-16-20	0,6535	17,922	0,20	1,257	36,464	45,821
5	1-6-11-16	0,5183	16,624	0,25	1,571	31,178	48,974
	2-7-12-17	0,5857	18,802	0,25	1,571	31,151	48,932
	3-8-13-18	0,1541	4,357	0,25	1,571	35,359	55,542
	4-9-14-19	0,0798	1,842	0,25	1,571	43,296	68,009
	5-10-15-20	0,6078	19,260	0,25	1,571	31,558	49,571
6	1-7-13-19	0,1039	3,130	0,30	1,885	33,182	62,547
	2-8-14-20	0,4381	15,995	0,30	1,885	27,390	51,629



Valores SPT real:

Perfil 1:

N°	Secuencia	Perfil 1					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	3,0950	14,724	1,00	6,283	210,201	1320,731
	2-3-4-5	2,4140	15,201	1,00	6,283	158,805	997,803
	3-4-5-6	3,4450	15,515	1,00	6,283	222,043	1395,137
	4-5-6-7	2,7160	15,039	1,00	6,283	180,597	1134,724
	5-6-7-8	2,1540	15,759	1,00	6,283	136,684	858,809
	6-7-8-9	2,5140	16,150	1,00	6,283	155,666	978,075
	7-8-9-10	1,7798	16,144	1,00	6,283	110,245	692,691
	8-9-10-11	2,0277	14,381	1,00	6,283	140,999	885,919
	9-10-11-12	1,7283	15,301	1,00	6,283	112,953	709,707
	10-11-12-13	1,7890	15,850	1,00	6,283	112,871	709,187
	11-12-13-14	1,9400	15,497	1,00	6,283	125,186	786,563
	12-13-14-15	1,8059	14,920	1,00	6,283	121,039	760,509
	13-14-15-16	2,1394	15,983	1,00	6,283	133,855	841,033
	14-15-16-17	2,2510	15,504	1,00	6,283	145,188	912,244
	15-16-17-18	2,7331	15,264	1,00	6,283	179,055	1125,037
	16-17-18-19	3,0860	14,584	1,00	6,283	211,602	1329,532
	17-18-19-20	2,3571	8,774	1,00	6,283	268,646	1687,951
2	1-3-5-7	1,7073	15,326	2,00	12,566	111,399	1399,879
	2-4-6-8	1,5179	15,820	2,00	12,566	95,948	1205,719
	3-5-7-9	1,4698	15,295	2,00	12,566	96,097	1207,587
	4-6-8-10	1,3872	15,586	2,00	12,566	89,003	1118,443
	5-7-9-11	1,3828	15,290	2,00	12,566	90,438	1136,479
	6-8-10-12	1,3165	15,106	2,00	12,566	87,151	1095,168
	7-9-11-13	1,2317	16,158	2,00	12,566	76,228	957,915
	8-10-12-14	1,0502	15,107	2,00	12,566	69,517	873,581
	9-11-13-15	1,0321	15,338	2,00	12,566	67,290	845,595
	10-12-14-16	1,1312	15,083	2,00	12,566	74,998	942,456
	11-13-15-17	1,2479	15,566	2,00	12,566	80,168	1007,424
	12-14-16-18	1,3324	14,830	2,00	12,566	89,845	1129,023
	13-15-17-19	1,4524	15,569	2,00	12,566	93,288	1172,290
14-16-18-20	1,4915	13,952	2,00	12,566	106,902	1343,372	
3	1-4-7-10	0,9232	15,195	3,00	18,850	60,757	1145,238
	2-5-8-11	0,8688	16,545	3,00	18,850	52,511	989,814
	3-6-9-12	0,9100	15,432	3,00	18,850	58,968	1111,527



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	4-7-10-13	0,9218	14,874	3,00	18,850	61,974	1168,180
	5-8-11-14	0,9113	15,594	3,00	18,850	58,439	1101,551
	6-9-12-15	0,8429	15,751	3,00	18,850	53,514	1008,715
	7-10-13-16	0,7445	15,688	3,00	18,850	47,457	894,536
	8-11-14-17	0,7527	15,291	3,00	18,850	49,225	927,869
	9-12-15-18	0,8312	15,298	3,00	18,850	54,334	1024,169
	10-13-16-19	0,8660	15,212	3,00	18,850	56,929	1073,081
	11-14-17-20	0,2714	4,318	3,00	18,850	62,860	1184,884
4	1-5-9-13	0,6857	16,172	4,00	25,133	42,400	1065,639
	2-6-10-14	0,6097	15,949	4,00	25,133	38,228	960,776
	3-7-11-15	0,6488	15,266	4,00	25,133	42,500	1068,132
	4-8-12-16	0,6315	15,341	4,00	25,133	41,164	1034,568
	5-9-13-17	0,6215	15,006	4,00	25,133	41,417	1040,916
	6-10-14-18	0,5907	15,153	4,00	25,133	38,982	979,733
	7-11-15-19	0,5682	14,688	4,00	25,133	38,685	972,250
	8-12-16-20	0,2065	4,082	4,00	25,133	50,590	1271,474
5	1-6-11-16	0,4902	15,169	5,00	31,416	32,316	1015,233
	2-7-12-17	0,4307	13,772	5,00	31,416	31,274	982,488
	3-8-13-18	0,5223	16,296	5,00	31,416	32,051	1006,905
	4-9-14-19	0,2500	8,234	5,00	31,416	30,362	953,847
	5-10-15-20	0,1088	2,868	5,00	31,416	37,939	1191,898
6	1-7-13-19	0,1399	4,623	6,00	37,699	30,251	1140,432
	2-8-14-20	0,0960	2,998	6,00	37,699	32,028	1207,427



Perfil 2:

N°	Secuencia	Perfil 2					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	2,8050	13,977	1,00	6,283	200,687	1260,952
	2-3-4-5	2,1756	15,196	1,00	6,283	143,169	899,558
	3-4-5-6	2,2540	14,198	1,00	6,283	158,755	997,485
	4-5-6-7	2,8390	16,643	1,00	6,283	170,582	1071,799
	5-6-7-8	1,3082	10,395	1,00	6,283	125,849	790,732
	6-7-8-9	1,5705	14,287	1,00	6,283	109,925	690,679
	7-8-9-10	2,0663	15,176	1,00	6,283	136,156	855,491
	8-9-10-11	2,2361	14,961	1,00	6,283	149,462	939,096
	9-10-11-12	3,0216	15,963	1,00	6,283	189,288	1189,329
	10-11-12-13	2,3844	15,323	1,00	6,283	155,609	977,721
	11-12-13-14	2,2198	14,723	1,00	6,283	150,771	947,321
	12-13-14-15	2,2007	15,968	1,00	6,283	137,819	865,944
	13-14-15-16	0,4640	2,612	1,00	6,283	177,669	1116,325
	14-15-16-17	1,8744	14,640	1,00	6,283	128,033	804,453
	15-16-17-18	3,6970	15,688	1,00	6,283	235,658	1480,681
	16-17-18-19	0,2192	1,463	1,00	6,283	149,805	941,253
	17-18-19-20	2,4392	15,897	1,00	6,283	153,438	964,077
2	1-3-5-7	0,9706	15,071	2,00	12,566	64,402	809,297
	2-4-6-8	1,1761	14,728	2,00	12,566	79,855	1003,483
	3-5-7-9	0,4867	5,635	2,00	12,566	86,371	1085,368
	4-6-8-10	0,8974	14,083	2,00	12,566	63,722	800,756
	5-7-9-11	0,3082	5,636	2,00	12,566	54,684	687,181
	6-8-10-12	0,7805	10,311	2,00	12,566	75,696	951,221
	7-9-11-13	1,3833	15,484	2,00	12,566	89,337	1122,646
	8-10-12-14	1,2512	14,836	2,00	12,566	84,335	1059,789
	9-11-13-15	0,9578	15,942	2,00	12,566	60,080	754,991
	10-12-14-16	0,3628	4,649	2,00	12,566	78,038	980,657
	11-13-15-17	1,1270	14,553	2,00	12,566	77,441	973,152
	12-14-16-18	1,1039	14,509	2,00	12,566	76,084	956,097
	13-15-17-19	1,4829	15,249	2,00	12,566	97,246	1222,025
14-16-18-20	1,3355	15,899	2,00	12,566	83,999	1055,562	
3	1-4-7-10	0,6527	13,620	3,00	18,850	47,922	903,311
	2-5-8-11	0,6393	16,353	3,00	18,850	39,094	736,899
	3-6-9-12	0,1691	2,468	3,00	18,850	68,509	1291,362
	4-7-10-13	0,5042	13,052	3,00	18,850	38,630	728,160
	5-8-11-14	0,6339	12,967	3,00	18,850	48,886	921,472



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,7801	15,031	3,00	18,850	51,899	978,280
	7-10-13-16	0,1786	3,660	3,00	18,850	48,787	919,610
	8-11-14-17	0,5045	14,952	3,00	18,850	33,741	636,008
	9-12-15-18	0,6632	18,482	3,00	18,850	35,884	676,389
	10-13-16-19	0,6443	14,320	3,00	18,850	44,993	848,098
	11-14-17-20	0,9435	16,323	3,00	18,850	57,802	1089,539
4	1-5-9-13	0,3622	13,689	4,00	25,133	26,459	664,992
	2-6-10-14	0,3828	15,318	4,00	25,133	24,990	628,072
	3-7-11-15	0,1678	3,200	4,00	25,133	52,447	1318,133
	4-8-12-16	0,1394	4,225	4,00	25,133	32,989	829,112
	5-9-13-17	0,2527	8,912	4,00	25,133	28,355	712,639
	6-10-14-18	0,4823	16,083	4,00	25,133	29,988	753,685
	7-11-15-19	0,4922	17,498	4,00	25,133	28,129	706,956
	8-12-16-20	0,4028	16,824	4,00	25,133	23,942	601,727
5	1-6-11-16	0,0556	1,182	5,00	31,416	47,080	1479,068
	2-7-12-17	0,3133	14,868	5,00	31,416	21,072	661,999
	3-8-13-18	0,0833	3,453	5,00	31,416	24,121	757,785
	4-9-14-19	0,4101	17,501	5,00	31,416	23,433	736,167
	5-10-15-20	0,3524	14,825	5,00	31,416	23,771	746,777
6	1-7-13-19	0,2652	13,560	6,00	37,699	19,556	737,234
	2-8-14-20	0,3045	15,528	6,00	37,699	19,610	739,269



Perfil 3:

N°	Secuencia	Perfil 3					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	1,4421	15,220	1,00	6,283	94,750	595,333
	2-3-4-5	1,5869	15,952	1,00	6,283	99,480	625,049
	3-4-5-6	1,2965	15,521	1,00	6,283	83,532	524,847
	4-5-6-7	1,1455	14,470	1,00	6,283	79,164	497,400
	5-6-7-8	1,0901	14,297	1,00	6,283	76,247	479,072
	6-7-8-9	1,4216	15,874	1,00	6,283	89,555	562,692
	7-8-9-10	1,1101	14,053	1,00	6,283	78,994	496,332
	8-9-10-11	1,3225	14,859	1,00	6,283	89,003	559,224
	9-10-11-12	1,4869	14,218	1,00	6,283	104,579	657,087
	10-11-12-13	1,2103	14,053	1,00	6,283	86,124	541,132
	11-12-13-14	1,0743	11,806	1,00	6,283	90,996	571,745
	12-13-14-15	1,7456	15,887	1,00	6,283	109,876	690,371
	13-14-15-16	1,4236	14,771	1,00	6,283	96,378	605,561
	14-15-16-17	0,2279	1,678	1,00	6,283	135,800	853,257
	15-16-17-18	1,6870	15,832	1,00	6,283	106,556	669,513
	16-17-18-19	1,3539	15,592	1,00	6,283	86,833	545,587
	17-18-19-20	1,4825	15,059	1,00	6,283	98,446	618,555
2	1-3-5-7	0,8994	16,662	2,00	12,566	53,979	678,321
	2-4-6-8	0,6797	15,221	2,00	12,566	44,655	561,156
	3-5-7-9	0,6749	14,644	2,00	12,566	46,087	579,148
	4-6-8-10	0,7709	14,754	2,00	12,566	52,250	656,595
	5-7-9-11	0,7530	16,488	2,00	12,566	45,670	573,900
	6-8-10-12	0,6452	14,900	2,00	12,566	43,302	544,149
	7-9-11-13	0,8050	16,055	2,00	12,566	50,140	630,079
	8-10-12-14	0,1367	1,494	2,00	12,566	91,488	1149,674
	9-11-13-15	0,6774	15,375	2,00	12,566	44,059	553,655
	10-12-14-16	0,7801	14,867	2,00	12,566	52,472	659,381
	11-13-15-17	0,9352	16,145	2,00	12,566	57,925	727,907
	12-14-16-18	0,8692	16,974	2,00	12,566	51,208	643,495
	13-15-17-19	0,7515	15,805	2,00	12,566	47,548	597,508
14-16-18-20	0,1039	2,082	2,00	12,566	49,904	627,111	
3	1-4-7-10	0,5986	17,997	3,00	18,850	33,261	626,956
	2-5-8-11	0,5268	15,965	3,00	18,850	32,997	621,982
	3-6-9-12	0,4946	15,803	3,00	18,850	31,298	589,950
	4-7-10-13	0,4947	16,013	3,00	18,850	30,894	582,331
	5-8-11-14	0,1186	3,235	3,00	18,850	36,655	690,936



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,4499	15,171	3,00	18,850	29,655	558,988
	7-10-13-16	0,4655	15,279	3,00	18,850	30,467	574,282
	8-11-14-17	0,4815	15,128	3,00	18,850	31,828	599,951
	9-12-15-18	0,5638	15,580	3,00	18,850	36,187	682,116
	10-13-16-19	0,5397	15,442	3,00	18,850	34,950	658,794
	11-14-17-20	0,5215	15,578	3,00	18,850	33,477	631,020
4	1-5-9-13	0,4304	17,456	4,00	25,133	24,656	619,679
	2-6-10-14	0,0729	2,310	4,00	25,133	31,543	792,754
	3-7-11-15	0,2265	9,652	4,00	25,133	23,471	589,885
	4-8-12-16	0,3699	16,579	4,00	25,133	22,311	560,745
	5-9-13-17	0,3613	15,807	4,00	25,133	22,857	574,458
	6-10-14-18	0,4065	16,175	4,00	25,133	25,131	631,620
	7-11-15-19	0,4090	15,286	4,00	25,133	26,757	672,464
	8-12-16-20	0,4005	16,063	4,00	25,133	24,933	626,636
5	1-6-11-16	0,3843	16,104	5,00	31,416	23,864	749,698
	2-7-12-17	0,3598	15,840	5,00	31,416	22,715	713,601
	3-8-13-18	0,3443	15,385	5,00	31,416	22,379	703,055
	4-9-14-19	0,3711	15,212	5,00	31,416	24,395	766,398
	5-10-15-20	0,3480	15,407	5,00	31,416	22,587	709,595
6	1-7-13-19	0,2833	15,126	6,00	37,699	18,726	705,954
	2-8-14-20	0,2899	15,096	6,00	37,699	19,204	723,964



Perfil 4:

N°	Secuencia	Perfil 3					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	1,5933	14,326	1,00	6,283	111,217	698,799
	2-3-4-5	1,4124	14,839	1,00	6,283	95,182	598,043
	3-4-5-6	1,3237	15,245	1,00	6,283	86,828	545,559
	4-5-6-7	2,1294	15,195	1,00	6,283	140,138	880,514
	5-6-7-8	0,8602	15,126	1,00	6,283	56,869	357,318
	6-7-8-9	1,4995	14,884	1,00	6,283	100,746	633,004
	7-8-9-10	1,2327	14,775	1,00	6,283	83,431	524,215
	8-9-10-11	1,2943	16,248	1,00	6,283	79,659	500,512
	9-10-11-12	1,5588	17,766	1,00	6,283	87,741	551,290
	10-11-12-13	1,3824	17,792	1,00	6,283	77,698	488,190
	11-12-13-14	1,5094	16,367	1,00	6,283	92,222	579,448
	12-13-14-15	1,4713	18,793	1,00	6,283	78,290	491,909
	13-14-15-16	1,7489	14,576	1,00	6,283	119,985	753,887
	14-15-16-17	1,4104	15,375	1,00	6,283	91,733	576,377
	15-16-17-18	1,6262	15,800	1,00	6,283	102,924	646,690
	16-17-18-19	1,7394	15,220	1,00	6,283	114,284	718,066
	17-18-19-20	1,7220	15,404	1,00	6,283	111,789	702,391
2	1-3-5-7	0,6867	15,045	2,00	12,566	45,643	573,567
	2-4-6-8	1,1883	16,098	2,00	12,566	73,817	927,606
	3-5-7-9	1,0250	15,932	2,00	12,566	64,336	808,468
	4-6-8-10	0,5675	16,579	2,00	12,566	34,230	430,147
	5-7-9-11	0,5840	15,862	2,00	12,566	36,818	462,663
	6-8-10-12	0,5503	10,991	2,00	12,566	50,068	629,175
	7-9-11-13	0,8222	16,047	2,00	12,566	51,237	643,862
	8-10-12-14	0,8920	17,176	2,00	12,566	51,933	652,608
	9-11-13-15	0,7930	17,363	2,00	12,566	45,672	573,929
	10-12-14-16	0,7732	15,866	2,00	12,566	48,733	612,398
	11-13-15-17	0,9463	16,009	2,00	12,566	59,111	742,804
	12-14-16-18	0,9711	17,663	2,00	12,566	54,979	690,890
	13-15-17-19	0,7678	16,750	2,00	12,566	45,839	576,027
14-16-18-20	0,9106	16,269	2,00	12,566	55,971	703,358	
3	1-4-7-10	0,6311	15,442	3,00	18,850	40,869	770,363
	2-5-8-11	0,6362	16,798	3,00	18,850	37,874	713,899
	3-6-9-12	0,4264	17,088	3,00	18,850	24,953	470,356
	4-7-10-13	0,4267	15,667	3,00	18,850	27,236	513,378
	5-8-11-14	0,5175	17,001	3,00	18,850	30,439	573,768



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,4868	12,889	3,00	18,850	37,769	711,921
	7-10-13-16	0,7827	16,524	3,00	18,850	47,367	892,855
	8-11-14-17	0,5938	17,797	3,00	18,850	33,365	628,918
	9-12-15-18	0,5524	15,411	3,00	18,850	35,845	675,653
	10-13-16-19	0,6480	19,204	3,00	18,850	33,743	636,039
	11-14-17-20	0,5620	15,776	3,00	18,850	35,624	671,491
4	1-5-9-13	0,5215	19,523	4,00	25,133	26,712	671,347
	2-6-10-14	0,3582	16,055	4,00	25,133	22,311	560,731
	3-7-11-15	0,4515	18,797	4,00	25,133	24,020	603,683
	4-8-12-16	0,3798	16,365	4,00	25,133	23,208	583,282
	5-9-13-17	0,3821	15,503	4,00	25,133	24,647	619,442
	6-10-14-18	0,4075	14,849	4,00	25,133	27,443	689,715
	7-11-15-19	0,4715	16,702	4,00	25,133	28,230	709,501
	8-12-16-20	0,4572	17,549	4,00	25,133	26,053	654,777
5	1-6-11-16	0,2928	15,407	5,00	31,416	19,005	597,059
	2-7-12-17	0,4488	15,839	5,00	31,416	28,335	890,173
	3-8-13-18	0,3074	14,463	5,00	31,416	21,256	667,764
	4-9-14-19	0,3958	18,352	5,00	31,416	21,567	677,551
	5-10-15-20	0,3533	14,909	5,00	31,416	23,697	744,466
6	1-7-13-19	0,4857	18,140	6,00	37,699	26,775	1009,396
	2-8-14-20	0,4133	15,069	6,00	37,699	27,427	1033,979



Perfil 5:

N°	Secuencia	Perfil 3					
		U [V]	I [mA]	a [m]	K [m]	R	resistividad
1	1-2-3-4	2,5262	20,026	1,00	6,283	126,146	792,598
	2-3-4-5	2,3331	15,450	1,00	6,283	151,010	948,821
	3-4-5-6	2,2104	15,093	1,00	6,283	146,452	920,184
	4-5-6-7	2,1492	18,857	1,00	6,283	113,974	716,117
	5-6-7-8	1,8271	16,116	1,00	6,283	113,372	712,335
	6-7-8-9	1,7598	16,282	1,00	6,283	108,083	679,102
	7-8-9-10	0,4592	7,508	1,00	6,283	61,161	384,288
	8-9-10-11	1,8544	17,584	1,00	6,283	105,460	662,621
	9-10-11-12	1,5482	18,629	1,00	6,283	83,107	522,176
	10-11-12-13	1,1985	16,763	1,00	6,283	71,497	449,227
	11-12-13-14	1,7690	16,640	1,00	6,283	106,310	667,965
	12-13-14-15	1,6392	15,772	1,00	6,283	103,931	653,017
	13-14-15-16	1,5879	15,279	1,00	6,283	103,927	652,992
	14-15-16-17	2,8419	16,419	1,00	6,283	173,086	1087,531
	15-16-17-18	0,9465	9,188	1,00	6,283	103,015	647,261
	16-17-18-19	3,2230	19,136	1,00	6,283	168,426	1058,251
	17-18-19-20	3,0779	17,193	1,00	6,283	179,021	1124,818
2	1-3-5-7	1,3292	15,662	2,00	12,566	84,868	1066,480
	2-4-6-8	0,4799	16,317	2,00	12,566	29,411	369,590
	3-5-7-9	0,5544	16,078	2,00	12,566	34,482	433,312
	4-6-8-10	0,8562	16,084	2,00	12,566	53,233	668,945
	5-7-9-11	0,7600	15,585	2,00	12,566	48,765	612,797
	6-8-10-12	0,8732	17,848	2,00	12,566	48,924	614,800
	7-9-11-13	1,0431	15,331	2,00	12,566	68,039	854,998
	8-10-12-14	0,9397	16,307	2,00	12,566	57,626	724,144
	9-11-13-15	0,9367	16,307	2,00	12,566	57,442	721,832
	10-12-14-16	0,9362	18,244	2,00	12,566	51,316	644,849
	11-13-15-17	1,0798	15,882	2,00	12,566	67,989	854,373
	12-14-16-18	0,3331	2,119	2,00	12,566	157,175	1975,112
	13-15-17-19	0,3587	5,531	2,00	12,566	64,853	814,962
14-16-18-20	1,3163	18,336	2,00	12,566	71,788	902,111	
3	1-4-7-10	0,4796	14,287	3,00	18,850	33,569	632,760
	2-5-8-11	0,6591	16,023	3,00	18,850	41,135	775,369
	3-6-9-12	0,7590	19,899	3,00	18,850	38,143	718,971
	4-7-10-13	0,4202	16,102	3,00	18,850	26,096	491,900
	5-8-11-14	0,8024	18,047	3,00	18,850	44,462	838,082



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

	6-9-12-15	0,7404	16,210	3,00	18,850	45,676	860,962
	7-10-13-16	0,7934	17,947	3,00	18,850	44,208	833,299
	8-11-14-17	0,6364	16,246	3,00	18,850	39,173	738,388
	9-12-15-18	0,2690	7,963	3,00	18,850	33,784	636,808
	10-13-16-19	0,3602	15,535	3,00	18,850	23,186	437,052
	11-14-17-20	0,3063	7,049	3,00	18,850	43,453	819,069
4	1-5-9-13	0,5655	18,071	4,00	25,133	31,293	786,484
	2-6-10-14	0,6084	16,733	4,00	25,133	36,359	913,808
	3-7-11-15	0,5619	16,933	4,00	25,133	33,183	833,987
	4-8-12-16	0,6434	19,276	4,00	25,133	33,378	838,887
	5-9-13-17	0,5869	15,426	4,00	25,133	38,046	956,203
	6-10-14-18	0,4334	13,712	4,00	25,133	31,607	794,379
	7-11-15-19	0,2176	6,915	4,00	25,133	31,461	790,690
	8-12-16-20	0,6535	17,922	4,00	25,133	36,464	916,429
5	1-6-11-16	0,5183	16,624	5,00	31,416	31,178	979,479
	2-7-12-17	0,5857	18,802	5,00	31,416	31,151	978,635
	3-8-13-18	0,1541	4,357	5,00	31,416	35,359	1110,841
	4-9-14-19	0,0798	1,842	5,00	31,416	43,296	1360,185
	5-10-15-20	0,6078	19,260	5,00	31,416	31,558	991,411
6	1-7-13-19	0,1039	3,130	6,00	37,699	33,182	1250,935
	2-8-14-20	0,4381	15,995	6,00	37,699	27,390	1032,571



ANEXO III:



“MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA”



Mediciones de Resistencia de Puesta a Tierra.

Se explicitan en este anexo las mediciones realizadas para determinar el valor de resistencia de puesta a tierra. La medición se realizó como se explica en el capítulo 5, en cuadratura y por el método de caída de potencial.



x [mm]	U [V]	I [mA]	R [Ω]
0	0,000	0,000	0,000
5	2,403	16,007	150,122
10	2,843	15,984	177,865
15	2,996	15,972	187,578
20	3,125	15,951	195,912
25	3,278	15,933	205,737
30	3,356	15,915	210,870
35	3,396	15,902	213,558
40	3,451	15,899	217,058
45	3,502	15,885	220,460
50	3,578	15,854	225,684
55	3,605	15,831	227,718
60	3,639	15,795	230,389
65	3,686	15,764	233,824
70	3,714	15,749	235,824
75	3,732	15,725	237,329
80	3,741	15,701	238,265
85	3,762	15,687	239,816
90	3,778	15,645	241,483
95	3,812	15,632	243,859
100	3,917	15,598	251,122
105	3,931	15,586	252,214
110	3,942	15,537	253,717
115	3,965	15,487	256,021
120	3,973	15,451	257,135
125	3,984	15,459	257,714
130	3,990	15,442	258,386
135	3,996	15,414	259,245
140	4,102	15,376	266,779
145	4,114	15,347	268,065
150	4,086	15,314	266,815
155	4,105	15,226	269,605
x [mm]	U [V]	I [mA]	R [Ω]
160	4,112	15,201	270,509
165	3,980	15,169	262,377
170	4,106	15,142	271,166
175	4,110	15,121	271,807
180	4,131	15,074	274,048



185	4,124	14,995	275,025
190	4,119	14,933	275,832
195	4,132	14,906	277,204
200	4,146	14,872	278,779
205	4,178	14,851	281,328
210	4,186	14,931	280,356
215	4,163	14,919	279,040
220	4,174	14,904	280,059
225	4,186	14,876	281,393
230	4,195	14,842	282,644
235	4,207	14,897	282,406
240	4,218	14,883	283,411
245	4,228	14,851	284,695
250	4,237	14,835	285,608
255	4,241	14,816	286,245
260	4,224	14,792	285,560
265	4,233	14,747	287,041
270	4,245	14,731	288,168
275	4,235	14,749	287,138
280	4,259	14,724	289,256
285	4,267	14,701	290,252
290	4,264	14,682	290,424
295	4,279	14,658	291,922
300	4,283	14,645	292,455
305	4,293	14,643	293,178
310	4,298	14,624	293,900
315	4,316	14,598	295,657
320	4,308	14,546	296,164
325	4,306	14,506	296,843
330	4,307	14,478	297,486
335	4,312	14,444	298,532
340	4,309	14,420	298,821
345	4,302	14,425	298,232
x [mm]	U [V]	I [mA]	R [Ω]
350	4,305	14,417	298,606
355	4,315	14,512	297,340
360	4,306	14,431	298,385
365	4,309	14,357	300,132
370	4,315	14,352	300,655



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXÁCTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO
INTEGRADOR

375	4,321	14,347	301,178
380	4,328	14,341	301,792
385	4,334	14,339	302,253
390	4,346	14,347	302,920
395	4,347	14,351	302,906
400	4,356	14,339	303,787
405	4,362	14,335	304,290
410	4,371	14,328	305,067
415	4,374	14,314	305,575
420	4,379	14,309	306,031
425	4,389	14,298	306,966
430	4,390	14,295	307,100
435	4,381	14,314	306,064
440	4,378	14,295	306,261
445	4,392	14,289	307,369
450	4,391	14,276	307,579



ANEXO IV:



“POLARIZACIÓN”



Polarización.

Se muestran a continuación los valores obtenidos durante las mediciones para observar el fenómeno de polarización. Las mismas corresponden para tensiones de alimentación de 80[V] y 50[V].

Tensión 80[V]:

t [s]	I [mA]	t [min]
0	28,543	0,00
10	25,660	0,17
20	23,551	0,33
30	21,601	0,50
40	20,035	0,67
50	18,856	0,83
60	17,987	1,00
70	17,758	1,17
80	16,524	1,33
90	16,162	1,50
100	15,543	1,67
110	15,353	1,83
120	14,959	2,00
130	14,657	2,17
140	14,337	2,33
150	14,083	2,50
160	13,904	2,67
170	13,722	2,83
180	13,599	3,00
200	13,268	3,33
220	13,011	3,67
240	12,732	4,00
260	12,537	4,33
280	12,353	4,67
300	12,104	5,00
320	11,903	5,33
340	11,715	5,67
360	11,601	6,00
380	11,498	6,33
400	11,374	6,67
420	11,207	7,00
450	11,039	7,50

t [s]	I [mA]	t [min]
540	10,666	9,00
570	10,518	9,50
600	10,415	10,00
630	10,310	10,50
660	10,264	11,00
690	10,180	11,50
720	10,091	12,00
750	9,996	12,50
780	9,958	13,00
810	9,912	13,50
840	9,857	14,00
870	9,802	14,50
900	9,758	15,00
930	9,961	15,50
960	9,618	16,00
990	9,574	16,50
1020	9,542	17,00
1050	9,471	17,50
1080	9,442	18,00
1110	9,413	18,50
1140	9,323	19,00
1170	9,342	19,50
1200	9,330	20,00
1230	9,297	20,50
1260	9,298	21,00
1320	9,260	22,00
1380	9,200	23,00
1440	9,156	24,00
1500	9,103	25,00
1560	9,099	26,00
1620	9,046	27,00
1680	9,066	28,00



480	10,910	8,00
510	10,756	8,50

1740	9,049	29,00
1800	8,980	30,00

Tensión 50[V]:

t [s]	I [mA]	t [min]
0	27,348	0,00
10	25,824	0,17
20	24,074	0,33
30	23,452	0,50
40	23,072	0,67
50	23,098	0,83
60	23,275	1,00
70	23,652	1,17
80	23,621	1,33
90	24,113	1,50
100	24,220	1,67
110	24,425	1,83
120	24,485	2,00
130	24,501	2,17
140	24,666	2,33
150	24,732	2,50
160	24,808	2,67
170	24,645	2,83
180	24,503	3,00
200	24,715	3,33
220	24,810	3,67
240	24,366	4,00
260	24,041	4,33
280	24,027	4,67
300	23,563	5,00
320	23,200	5,33
340	23,850	5,67
360	22,408	6,00
390	21,920	6,50
420	21,361	7,00
450	20,885	7,50
480	20,479	8,00
510	19,945	8,50

t [s]	I [mA]	t [min]
540	19,619	9,00
570	19,226	9,50
600	18,937	10,00
630	18,602	10,50
660	18,335	11,00
690	18,100	11,50
720	17,852	12,00
750	17,618	12,50
780	17,495	13,00
810	17,306	13,50
840	17,113	14,00
870	16,946	14,50
900	16,807	15,00
930	16,667	15,50
960	16,657	16,00
990	16,574	16,50
1020	16,274	17,00
1050	16,176	17,50
1080	16,131	18,00
1110	16,048	18,50
1140	16,021	19,00
1170	15,978	19,50
1200	15,916	20,00
1260	15,778	21,00
1320	15,765	22,00
1380	15,676	23,00
1440	15,600	24,00
1500	15,531	25,00
1560	15,474	26,00
1620	15,403	27,00
1680	15,342	28,00
1740	15,261	29,00
1800	15,176	30,00



ANEXO V:



“MEMORIA DE CALCULO DE TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO DEL TC1206”



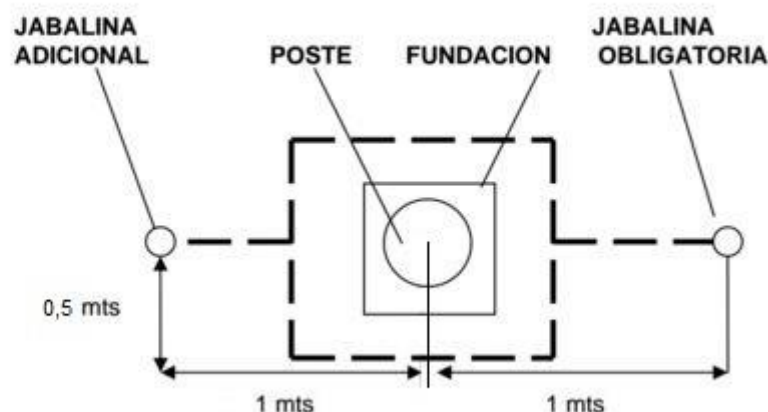
Memoria de Calculo Tensiones de Paso y de Contacto.

La siguiente memoria de cálculo se hace siguiendo la metodología indicada por la norma IEEE Std. 80, (2000) y esta aplicada al electrodo del SPT utilizado en subestaciones aéreas monoposte usadas en zonas rurales.

Características del Terreno:			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
resistividad del terreno natural	ρ_1	307,6 [Ωm]	Talocchino-Lozano
material de recubrimiento	H^e		Hipótesis: Hormigón
espesor del recubrimiento	h_s	0,1 [m]	Hipótesis
resistividad del recubrimiento	ρ_s	3000 [Ωm]	García Márquez

Características del Sistema:			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
frecuencia de la red	f	50 [Hz]	Red
corriente de cortocircuito simétrica fase-tierra	I_f	3,85 [kA]	Hipótesis
tiempo de falla para tensiones admisibles	t_s	0,5 [s]	Hipótesis
temperatura admisible del conductor	T_m	1084	Tabla 6.1
temperatura ambiente	T_a	40 [$^{\circ}\text{C}$]	AEA
coeficiente térmico de resistividad	α_r	0,00378	Tabla 6.1
factor de crecimiento del sistema	C_p	1	Hipótesis
factor de decremento para la duración de la falla	D_f	1,036	UTN X/R=3,33

MALLA PARA SUBESTACION EN MONOPOSTE





Características de la Red de PAT:			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
longitud total de conductor en la red horizontal	Lc	4,5[m]	TC1206
longitud perimetral de la red	Lp	4[m]	TC1206
longitud máxima de la red en la dirección x	Lx	2,5[m]	TC1206
longitud máxima de la red en la dirección y	Ly	2[m]	TC1206
distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la red	Dm	1,41[m]	TC1206
distancia entre conductores paralelos de la red	D	1[m]	TC1206
profundidad de instalación conductores de la red	h	0,5[m]	TC1206
cantidad de jabalinas	nr	1	TC1206
Diámetro Conductor	ϕ_c	5,8[mm]	TC1206
Diámetro Jabalina	ϕ_j	14[mm]	TC1206
Lado menor de la malla	a	1[m]	TC1206
Lado mayor de la malla	b	1[m]	TC1206
longitud efectiva de conductores enterrados	Lm	4[m]	TC1206
longitud de la jabalinas	Lr	1,5[m]	TC1206
longitud total de las jabalinas	LR	1,5[m]	TC1206
	Ls	4,65[m]	
Longitud para SVERAK	Lt	6[m]	Std. 80
área cubierta por la red	A	1[m ²]	TC1206

Coeficientes de Norma y Datos Varios			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
profundidad de referencia de la red	h0	1 [m]	UTN
peso de una persona	P	50 [kg]	Hipótesis: Niño



Desarrollo del Calculo:			
Dato	símbolo	valor	fuelle
factor de capacidad térmica	TCAP	3,85	tabla 6.1
inversa del coeficiente térmico de resistividad	k0	245	tabla 6.1
tensión de contacto admisible	Et	696,656309	calculo
tensión de paso admisible	Es	2294,47891	calculo
primer coeficiente de Schwarz	k1	1,08	capítulo 5
segundo coeficiente de Schwarz	k2	4,35	capítulo 5
Resistencia de la red	R1	122,4767 [Ω]	calculo

$$R_1 = \frac{307.6}{\pi \cdot 4.5} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 4.5}{a} \right) + \frac{1.08 \cdot 4.5}{\sqrt{1}} - 4.35 \right)$$

$$R_1 = 122.471676097$$

$$a = \sqrt{2 \cdot 0.0029 \cdot 0.5}$$

$$a = 0.0538516480713$$

Resistencia de las jabalinas	R2	187,78 [Ω]	calculo
------------------------------	----	------------	---------

$$R_2 = \frac{307.6}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1.5} \left(\ln \left(\left| \frac{4 \cdot 1.5}{b} \right| \right) - 1 + \frac{2 \cdot 1.08 \cdot 1.5}{\sqrt{1}} \cdot (\sqrt{1} - 1)^2 \right)$$

$$R_2 = 187.782543214$$

$$b = \frac{14}{1000 \cdot 2}$$

$$b = 0.007$$



Resistencia mutua de la red	R _m	71,8405 [Ω]	calculo
-----------------------------	----------------	-------------	---------

$$R_m = \frac{307.6}{\pi \cdot 4.5} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 4.5}{1.5} \right) + \frac{1.08 \cdot 4.5}{\sqrt{1}} - 4.35 + 1 \right)$$

$$R_m = 71.8405050292$$

Resistencia del sistema SVERAK	R _g	141,302 [Ω]	calculo
Resistencia del sistema SCHWARZ	R _g	107,081 [Ω]	calculo

$$R_{sverak} = 307.6 \cdot \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 1}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \cdot \sqrt{\frac{20}{1}}} \right) \right)$$

$$R_{sverak} = 141.302754908$$

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_g = 107.081716393$$

factor de división de corriente por la malla	Sf	1	Puede tomarse 0,6 - 0,7
Corriente drenada por la red	IG	3,9886 [kA]	calculo
potencial de la red durante la falla	GPR	563,597157	SVERAK
potencial de la red durante la falla	GPR	427,103277	SCHWARZ

$$\mathbf{GPR = 427,103277 < 696,656309 = Et Adm}$$



Tensión de contacto máxima o tensión de malla:			
Dato	símbolo	valor	fuentes
factor de corrección por irregularidad de la corriente	Ki	0,82715	calculo
factor	n	1,2375	calculo

na	2,25
nb	1
nc	1,25
nd	0,44

factor de corrección por conductores internos	Kii	0,23116329	calculo
Profundidad de referencia de la malla	h0	1	
factor de corrección por profundidad malla	Kh	1,22474487	calculo
factor de espaciamento definido para "n" conductores paralelos	Km	0,8123	calculo

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.0058} + \frac{(1 + 2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 1 \cdot 0.0058} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.0058} \right) + \frac{0.2311}{1.2247} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot 1.2375 - 1)} \right)$$

$$K_m = 0.812353751371$$

tensión de contacto malla	Em	107,302 [V]	calculo
---------------------------	----	-------------	---------



Tensión de paso máxima:			
Dato	símbolo	valor	fuentes
Factor de corrección por geometría	Ki	0,82715	calculo
factor de espaciamiento tensión de paso	Ks	0,3083	calculo

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot 0.5} + \frac{1}{1 + 0.5} + \frac{1}{1} \cdot (1 - 0.5^{1.2375})^{-2} \right)$$

$$K_s = 0.308836634533$$

Tensión de paso máxima	Es	67,28 [V]	calculo
------------------------	----	-----------	---------

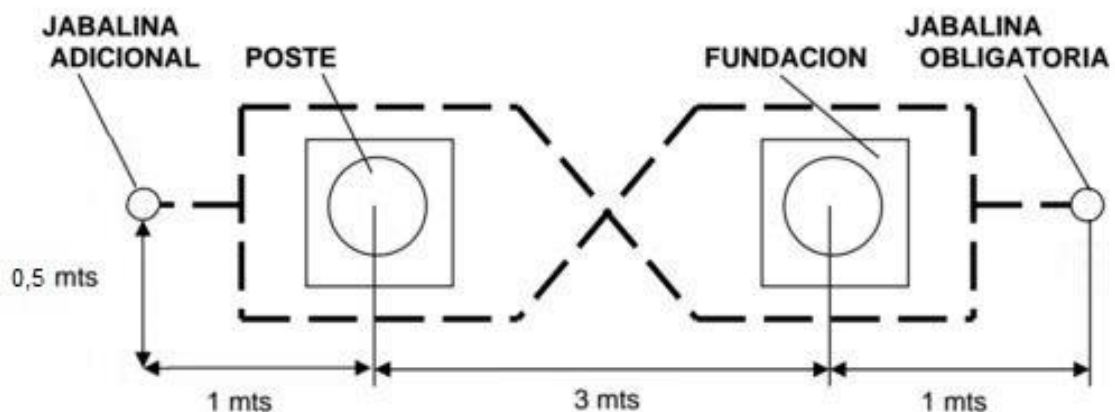


La siguiente memoria de cálculo se hace siguiendo la metodología indicada por la norma IEEE Std. 80, (2000) y esta aplicada al electrodo del SPT utilizado en subestaciones aéreas biposte usadas en zonas urbanas.

Características del Terreno:			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
resistividad del terreno natural	ρ_1	307,6 [Ωm]	Talocchino-Lozano
material de recubrimiento	Hº		Hipótesis: Hormigón
espesor del recubrimiento	hs	0,1 [m]	Hipótesis
resistividad del recubrimiento	ρ_s	3000 [Ωm]	García Márquez

Características del Sistema:			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
frecuencia de la red	f	50 [Hz]	Red
corriente de cortocircuito simétrica fase-tierra	I _f	3,85 [kA]	Hipótesis
tiempo de falla para tensiones admisibles	t _s	0,5 [s]	Hipótesis
temperatura admisible del conductor	T _m	1084	Tabla 6.1
temperatura ambiente	T _a	40 [°C]	AEA
coeficiente térmico de resistividad	α_r	0,00378	Tabla 6.1
factor de crecimiento del sistema	C _p	1	Hipótesis
factor de decremento para la duración de la falla	D _f	1,036	UTN X/R=3,33

MALLA PARA SUBESTACION EN PLATAFORMA (BIPOSTE)





Características de la Red de PAT:			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
longitud total de conductor en la red horizontal	Lc	10,98 [m]	TC1206
longitud perimetral de la red	Lp	10,48 [m]	TC1206
longitud máxima de la red en la dirección x	Lx	8,5 [m]	TC1206
longitud máxima de la red en la dirección y	Ly	4 [m]	TC1206
distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la red	Dm	4,12 [m]	TC1206
distancia entre conductores paralelos de la red	D	1 [m]	TC1206
profundidad de instalación conductores de la red	h	0,5 [m]	TC1206
cantidad de jabalinas	nr	1	TC1206
Diámetro Conductor	ϕ_c	5,8 [mm]	TC1206
Diámetro Jabalina	ϕ_j	14 [mm]	TC1206
Lado menor de la malla	a	1 [m]	TC1206
Lado mayor de la malla	b	4 [m]	TC1206
longitud efectiva de conductores enterrados	Lm	13 [m]	TC1206
longitud de la jabalinas	Lr	1,5 [m]	TC1206
longitud total de las jabalinas	LR	1,5 [m]	TC1206
Longitud para SVERAK	Lt	12,48 [m]	Std. 80
área cubierta por la red	A	3 [m ²]	TC1206

Coeficientes de Norma y Datos Varios			
Datos	Símbolo	Valor	Fuente
peso de una persona	P	50 [kg]	Hipótesis: Niño



Desarrollo del Calculo:			
Dato	símbolo	valor	fuelle
factor de capacidad térmica	TCAP	3,85	tabla 6.1
inversa del coeficiente térmico de resistividad	k0	245	tabla 6.1
tensión de contacto admisible	Et	696,656309	calculo
tensión de paso admisible	Es	2294,47891	calculo
primer coeficiente de Schwarz	k1	0,93	capítulo 5
segundo coeficiente de Schwarz	k2	4,2	capítulo 5
Resistencia de la red	R1	63,43 [Ω]	calculo

$$R_1 = \frac{307.6}{\pi \cdot 13} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot 13}{a}\right) + \frac{0.93 \cdot 12}{\sqrt{3}} - 4.2 \right)$$

$$R_1 = 63.4383764742$$

$$a = \sqrt{2 \cdot 0.0029 \cdot 0.5}$$

$$a = 0.0538516480713$$

Resistencia de las jabalinas	R2	187,78 [Ω]	calculo
------------------------------	----	------------	---------

$$R_2 = \frac{307.6}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1.5} \left(\ln\left(\frac{4 \cdot 1.5}{b}\right) - 1 + \frac{2 \cdot 0.93 \cdot 1.5}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{1} - 1)^2 \right)$$

$$R_2 = 187.782543214$$

$$b = \frac{14}{1000 \cdot 2}$$

$$b = 0.007$$



Resistencia mutua de la red	R _m	49,95 [Ω]	calculo
-----------------------------	----------------	-----------	---------

$$R_m = \frac{307.6}{\pi \cdot 13} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 13}{1.5} \right) + \frac{0.93 \cdot 13}{\sqrt{3}} - 4.2 + 1 \right)$$

$$R_m = 49.9562417316$$

Resistencia del sistema SVERAK	R _g	81,69 [Ω]	calculo
Resistencia del sistema SCHWARZ	R _g	62,23 [Ω]	calculo

$$R_{sverak} = 307.6 \cdot \left(\frac{1}{12.48} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 3}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \cdot \sqrt{\frac{20}{3}}} \right) \right)$$

$$R_{sverak} = 81.6919412759$$

$$R_{schwarz} = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m}$$

$$R_{schwarz} = 62.2370689877$$

factor de división de corriente por la malla	Sf	1	Puede tomarse 0,6 - 0,7
Corriente drenada por la red	IG	4,00 [kA]	calculo
potencial de la red durante la falla	GPR	327,521	SVERAK
potencial de la red durante la falla	GPR	249,499	SCHWARZ

$$GPR = 249,5 < 696,656309 = Et \text{ Adm}$$



Tensión de contacto máxima o tensión de malla:			
Dato	símbolo	valor	fuentes
factor de corrección por irregularidad de la corriente	Ki	0,8342	calculo
factor	n	1,285	calculo

na	2,09
nb	1,229
nc	1,16
nd	0,43

factor de corrección por conductores internos	Kii	0,23116329	calculo
Profundidad de referencia de la malla	h0	1	AEA
factor de corrección por profundidad malla	Kh	1,22474487	calculo
factor de espaciamento definido para "n" conductores paralelos	Km	0,7493	calculo

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.0058} + \frac{(1 + 2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.0058} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.0058} \right) + \frac{0.23012}{1.2247} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot 1.2854 - 1)} \right)$$

$K_m = 0.744933966019$

tensión de contacto malla	Em	56,697 [V]	calculo
---------------------------	----	------------	---------



Tensión de paso máxima:			
Dato	símbolo	valor	fuelle
Factor de corrección por geometría	Ki	0,834252138	calculo
factor de espaciamento tensión de paso	Ks	0,3264	calculo

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot 0.5} + \frac{1}{1 + 0.5} + \frac{1}{1} \cdot \left(1 - 0.5^{1.28 \sqrt{54 - 2}} \right) \right)$$

$$K_s = 0.326470874756$$

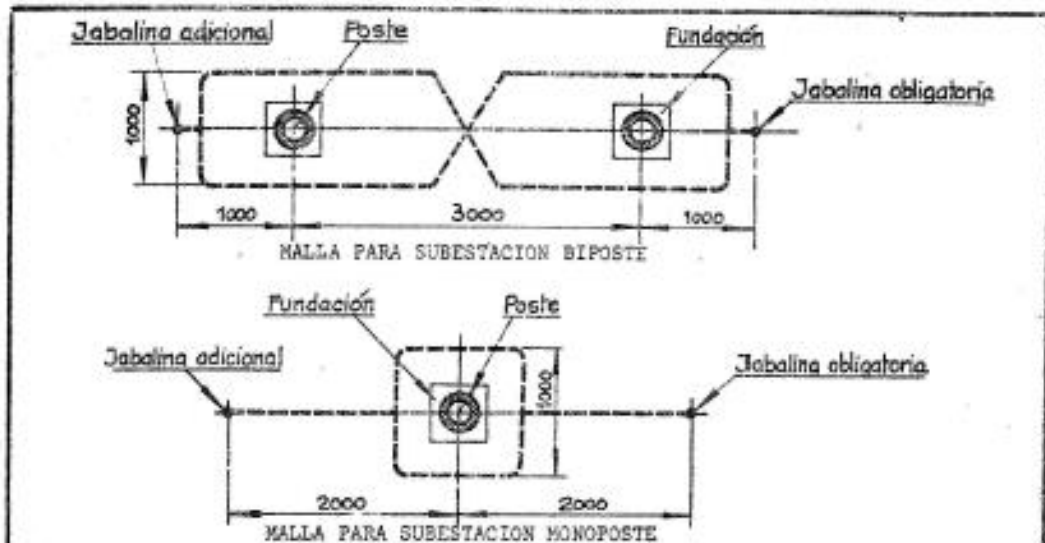
Tensión de paso máxima	Es	35,31 [V]	calculo
------------------------	----	-----------	---------



ANEXO VI:



"TC1206"



NOTAS:

1. Las medidas y formas de las mallas son aproximadas debiéndose adaptar a las condiciones reales impuestas por las fundaciones y otros obstáculos eventuales.
2. La malla se ubicará en un plano horizontal situado como mínimo a 500 mm por debajo de la superficie del terreno.
3. La malla estará constituida por alambres de cobre de 3,5 mm de diámetro mínimo y en número tal que la sección no sea inferior a 25 mm², o por cable de cobre de 3 o 7 alambres con 25 mm² de sección mínima.
4. La unión de los extremos de la malla con los chicotes que la vinculen a las jabalinas y a la toma de tierra de la estructura se hará con grampas G413 y G414 de latón. Las superficies de cobre abrazadas serán estañadas previamente.
5. El chicote de vinculación con la toma de tierra de la estructura será cable de acero cincado de 9,5 mm de diámetro, según ET19, con una grampa G301B, o cable de cobre de 25 mm², con una grampa G301A; o será un fleje de acero cincado de 32x1,6 mm con agujeros de 14 y 10 mm de diámetro en sus extremos. El empleo de cable de acero, cable de cobre o fleje de acero se determinará en el plano o en las especificaciones particulares. En todos los casos esta vinculación será impregnada por inserción en un baño caliente de alquitrán sólido fundido, excepto los extremos, que deberán limpiarse para permitir la correcta continuidad eléctrica. /El chicote de vinculación de la malla con cada jabalina será cable de cobre de 25 mm² y su contacto se asegurará con una grampa adecuada al tipo de jabalina. /En todos los casos las uniones y vinculaciones eléctricas con grampas o terminales serán protegidos, previa verificación de la correcta continuidad eléctrica, con alquitrán fundido o pintura de base bituminosa.
6. La resistencia de puesta a tierra será de 5 ohm como máximo. Cuando no se lograre este valor o los prescritos en los planos o especificaciones técnicas correspondientes con una sola jabalina, se instalará otra adicional según lo indicado en los dibujos. Las jabalinas estarán en el eje que pasa por el centro de ambos postes de una estructura biposte o en el eje que pasa por el centro de una monoposte y paralelo al cordón de la vereda, la línea de edificación o el eje de la calle o camino adyacentes. Otras jabalinas se instalarán sobre el mismo eje.
7. Las jabalinas tendrán por lo menos 1,50 m de largo y serán caños de cobre o de latón de 20 mm de diámetro con un espesor de pared mínimo de 3 mm, o serán de acero recubierto con una vaina adherida y continua de cobre de 1 mm de espesor medio con un diámetro mínimo de 14 mm.

TC 1206

DIB. P. GAMBOA	MALLAS DE PUESTA A TIERRA PARA	ESC. —
REV. HAUEN	SUBESTACIONES AEREAS	PLANO: 18.4.78
EMPRESA PROVINCIAL DE ENERGIA DE CORDOBA - NORMALIZACION - DIV. EST. APLIC. - GER. ING.		



Bibliografía:

- “Comportamiento y validación de modelos a escala de sistemas de puesta a tierra”, Talocchino - Lozano, (2015).
- “Ensayos sobre modelos a escala de sistemas de puesta a tierra”, Gerardo Carvajal, (2004).
- “Puesta a tierra de sistemas y redes de BT, MT y AT”, Ing. Juan Carlos Arcioni, (2002).
- “Tratamiento de neutro y puesta a tierra”, Modulo 6, AEA, (2012).
- Norma IRAM 2281: “Puesta a tierra de sistemas eléctricos, centrales, subestaciones y redes”, Parte IV (1996).
- “Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de Wenner”, Cárdenas Valencia – Galvis García, (2011).
- “2D and 3D Subsurface Resistivity Imaging Using a Constrained Least-Squares Algorithm”, Gasulla – Jordana - Pallás-Areny, (1999).
- Norma UNESA MIE RAT 13: “Método de cálculo y proyecto de instalaciones de puesta a tierra para centros de transformación conectados a redes de tercera categoría”, (1989).
- “Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad”, Prof. Ing. Gabriela Souto, (2009).
- “Especificaciones técnicas generales para subestaciones transformadoras aéreas ETG-6”, Dpto. Estudios y proyectos – DECA, (1985).
- TC1206, EPEC, (1978, 2000).
- “Construcción de subestaciones aéreas tipo E415M-APR en la ciudad de Córdoba”, EPEC, (2015).
- TC115, ENERSA, (2005).
- “Instalaciones de puesta a tierra”, Rogelio Garcia Marquez, (1999).
- “Some considerations in the behavior of Grounding Systems with impulsive solicitations”, Ybañez - Molina - Piumetto - Carvajal, (2013).
- “Centros de Transformación MT/BT”, Centro de Formación Schneider, (2000).
- Norma IEEE Std. 81.2: “Guide for Measurement of Impedance and Safety characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems”, (1991).
- Norma IEEE Std. 81: “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”, (1983).
- Norma IEEE Std. 80: “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, (2000).
- Norma IEEE Std. 142TM: “Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, (2007).
- Norma IEEE Std. 1100: “Powering and Grounding Electronic Equipment”, (2005).
- “Designing For A Low Resistance Earth Interface”, Carpenter, Jr. - Lanzoni, (1999).



- “Características geotécnicas de los loess de Argentina”, Rocca – Redolfi – Terzariol, (2006).
- “Complex Dielectric Permittivity of Soil–Organic Mixtures (20 MHz–1.3 GHz)”, Francisca – Rinaldi, (2003).
- “Removal of Immiscible Contaminants from Sandy Soils Monitored by Means of Dielectric Measurements”, Francisca – Rinaldi, (2006).
- “Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay”, Rinaldi – Cuestas, (2002).