

UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



**DISEÑO DE MALLAS DE TIERRA DE MEDIA Y
BAJA TENSIÓN EN SUBESTACIONES DE
DISTRIBUCIÓN**

Memoria para optar al título de:
Ingeniero de Ejecución Eléctrico

Alumno:
Hugo Washington Colman Ortega

Profesor Guía:
Ildefonso Harnisch Veloso

Profesor Informante:
Raúl Sanhueza Hormazabal

Arica – Chile
2020

*(A mi familia, en especial a
mis padres por su apoyo
incondicional, esfuerzo e
inspiración)*

ÍNDICE GENERAL	Pág.
RESUMEN	1
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Generalidades	2
1.2 Descripción del trabajo	2
1.3 Objetivos	3
2 MALLAS A TIERRA EN SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN	4
2.1 Conceptos básicos	4
2.2 Diseño de mallas a tierra de media tensión	6
2.2.1 Objetivos de la puesta a tierra de protección	6
2.3 Diseño de mallas a tierra de baja tensión	6
2.3.1 Objetivos de la puesta a tierra de servicio	7
3 RESISTIVIDAD DEL SUELO	8
3.1 Principales factores que determinan la resistividad del suelo	8
3.1.1 Humedad	8
3.1.2 Temperatura	8
3.1.3 Sales solubles	8
3.1.4 Granulometría:	9
3.1.5 Compactación:	9
3.1.6 Estratificación del suelo	9
3.2 Medida de la resistividad del suelo	10
3.2.1 Método de Schlumberger	11
3.2.2 Método de Wenner	13
3.2.3 Consideraciones	13
3.3 Instrumento utilizado para llevar a cabo el SEV	15

4	INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES	16
4.1	Clasificación de las curvas patrones	16
4.1.1	Curvas de dos capas	16
4.1.2	Curvas de tres capas	17
4.1.3	Curvas de cuatro capas	18
4.2	Procedimiento	18
5	RESISTIVIDAD EQUIVALENTE	23
5.1	Método de Burgsdorf-Yakobs	23
6	PUESTAS A TIERRA SEGÚN LA DISPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS	25
6.1	Barra vertical	25
6.2	Conjunto de barras verticales	26
6.3	Electrodo horizontal	27
6.4	Mallas de tierra	28
6.4.1	Método de Laurent	29
6.4.2	Método de Schwarz	29
6.5	Mallas a tierra con barras verticales	30
7	INFLUENCIA DE LA CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO Y CONDICIONES DE SEGURIDAD	32
7.1	Efectos de la corriente en el cuerpo humano	32
7.1.1	Efecto de la frecuencia	32
7.1.2	Umbral de percepción	32
7.1.3	Umbral de no soltar o corrientes de abandono	33
7.1.4	Umbral de fibrilación ventricular	33
7.2	Tensiones de paso y contacto	34
7.2.1	La resistencia del cuerpo humano <i>R_{ch}</i>	35
7.2.2	Resistencia a tierra de un pie <i>R_p</i>	35
7.2.3	Tensión de paso	37
7.2.4	Tensión de contacto	37

8	CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA Y TIEMPO DE DESPEJE DE LAS PROTECCIONES	39
8.1	Reactancias de secuencia equivalentes del sistema	39
8.1.1	Reactancia de cortocircuito de secuencia positiva y negativa.	39
8.1.2	Reactancia de cortocircuito de secuencia cero	40
8.2	Corriente simétrica máxima de cortocircuito monofásico	42
8.3	Corriente rms máxima de cortocircuito monofásico durante la falla	43
8.4	Tiempo de despeje de las protecciones	45
9	CRITERIOS DE DISEÑO	46
9.1	Puesta a tierra de media tensión	46
9.2	Dimensionamiento del conductor enterrado MT y BT.	50
9.3	Procedimiento de diseño	51
10	CONSTRUCCIÓN DE LA PUESTA A TIERRA	54
10.1	Camarillas de inspección	54
10.2	Medición de resistencia de puesta a tierra	54
10.3	Tratamientos químicos de los suelos	56
11	DESARROLLO DEL DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN	57
11.1	Diseño de puesta a tierra de media tensión (tierra de protección)	57
11.2	Diseño de puesta a tierra para baja tensión (tierra de servicio)	69
12	CONCLUSIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	74

RESUMEN

Las puestas a tierra se definen como un conjunto de electrodos cuya finalidad es establecer el contacto directo con el suelo o terreno. En una subestación de distribución son un elemento esencial para otorgar seguridad a las personas e influir en el correcto funcionamiento del sistema eléctrico. Es por ello la importancia de conocer la manera correcta de diseñarlas y no inferir así en errores que puedan poner en riesgo principalmente a las personas. Deben estar presentes dos puestas a tierra, una es la puesta a tierra de protección que se diseña para media tensión y la otra es la puesta a tierra de servicio para baja tensión.

Para poder llevar a cabo el diseño es necesario conocer el área de la subestación, la estratificación del terreno en el que cual se instalará la puesta a tierra, la geometría que presentará la disposición de los electrodos, las dimensiones y la corriente máxima de falla presente en el punto de instalación. La estratificación del terreno se refiere a la cantidad de capas presentes, la resistividad y espesor de cada una de ellas. Para poder obtenerla es necesario crear una curva de terreno de resistividad aparente que se genera mediante una serie de medidas del suelo realizadas por el método de cuatro electrodos y con dicha curva proceder a comparar con las presentadas por Orellana y Mooney en las conocidas como curvas patrón, obteniendo mediante este proceso las características del terreno. Con estos parámetros se llevan a cabo una serie de cálculo matemáticos los cuales permiten obtener las características que presentará la puesta a tierra. Es importante tener en consideración las especificaciones que presentan las normas eléctricas con respecto a los sistemas de puesta a tierra, tanto de media como de baja tensión, ya que las características del diseño deberán cumplir con ellas. Entre las principales exigencias están la tensión de paso, la tensión de contacto, la sección del conductor y la resistividad de puesta a tierra.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Las subestaciones de distribución contienen transformadores cuyas potencias varían en un rango que va desde los 5 kVA hasta los 2500 kVA aproximadamente, pueden ser diseñadas en construcciones del tipo aéreas, de piso o en bóvedas subterráneas.

Deben estar presente la puesta a tierra de protección y la puesta a tierra de servicio. Los principales objetivos que se buscan lograr con las puestas a tierra son evitar voltajes peligrosos que puedan afectar y poner en riesgo a las personas, proporcionar una vía de baja impedancia de falla permitiendo la correcta operación de los elementos de protección, servir como vía de retorno para corrientes anómalas o provocadas por desequilibrios en el sistema aportando de esta manera al correcto funcionamiento del mismo junto con un nivel de referencia cero de voltaje en el neutro de los transformadores.

Las normas nacionales que hacen referencia a criterios de diseño de las puestas a tierras son la Nch Elec 4/2003 (sección 10 de la norma), la NSEG 20 e.p 78 y el reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica (pliego técnico normativo RIC N°6).

La información y metodología de cálculo más completa para las puestas a tierra se encuentra en la publicación IEEE N°80 – 2000. El desarrollo de los cálculos es relativamente sencillo. Sin embargo, la mayor dificultad la presenta el estudio geológico de la estratificación del terreno, el cual se obtiene media el sondeo eléctrico vertical y la utilización del método de las curvas patrones.

1.2 Descripción del trabajo

El presente trabajo comienza desarrollando en el capítulo 2 la definición y explicación de las puestas a tierra necesarias en una subestación, es decir, la puesta a tierra de servicio y la puesta a tierra de protección. En ambas puestas a tierra es de necesidad que estas presenten un valor de resistencia bajo para así asegurar la derivación al terreno de las intensidades de corriente que se pudiesen originar y que presenten un riesgo tanto para las personas como para la instalación. El principal factor que afecta la resistencia de la puesta a tierra es la resistividad del suelo, es por ello que para poder conocer las características que presenta el terreno se explica en el capítulo 3 el método de los cuatro electrodos, mediante el cual se realizan una serie de medidas que posteriormente son interpretadas con la aplicación de las curvas patrones presentadas por Orellana y Mooney. Ya en el capítulo 4 se explica la manera en que se interpretan las medidas y como obtener

la estratificación del terreno mediante la comparación de curvas. El método de Burgsdorf-Yakobs desarrollado en el capítulo 5 se utiliza para obtener la resistividad equivalente del terreno, valor de interés para luego calcular la resistencia de la puesta a tierra. Según sea la disposición de los electrodos de puesta a tierra se cuenta con diferentes fórmulas para la obtención de la resistencia de puesta a tierra, si bien, en la puesta a tierra de protección únicamente se utilizará una configuración de malla, en la puesta a tierra de servicio es posible encontrar otras configuraciones y por ello en el capítulo 6 se detallan diversos tipos de disposición de electrodos y el cálculo de la resistencia de puesta a tierra para cada uno de ellos. Además de contar con un valor de resistencia bajo, la puesta a tierra de protección debe cumplir con ciertas condiciones de seguridad que están ligadas a los efectos de la corriente en el cuerpo humano, los cuales son importantes mitigar para que no presenten riesgos. Estos efectos y valores límites de corriente tolerables se presentan en el capítulo 7, donde también se definen la tensión de paso y de contacto. El capítulo 8 está destinado más que nada a la obtención de parámetros del sistema eléctrico, como los son las reactancias de secuencia, que son necesarios para el cálculo de la corriente máxima que circulará por la malla de puesta a tierra en caso de una falla, otro aspecto que se desarrolla en este capítulo es la obtención del tiempo de despeje de las protecciones, valor de mucha importancia ya que los efectos de la corriente sobre el cuerpo humano mencionados anteriormente están ligados tanto a la intensidad de corriente como al tiempo de circulación de esta por el cuerpo. Ya con la corriente máxima de circulación a través de la malla es posible determinar las tensiones de malla y de periferia que se presentarán en la puesta a tierra, estas se definen y desarrollan en el capítulo 9 como también se indica el criterio y límite que estos factores deben cumplir en el diseño. Una vez que el diseño se ha realizado y cumple con los aspectos de seguridad necesarios ya está listo para pasar a la fase de implementación, algunos aspectos que es importante tener presentes en esta fase se explican en el capítulo 10, para ya finalmente culminar el trabajo en el capítulo 11 con el desarrollo del diseño y cálculo de un sistema de puesta a tierra de protección y otro para un sistema de puesta a tierra de servicio donde se aplica lo desarrollado en la extensión del trabajo en general.

1.3 Objetivos

- Identificar los conceptos básicos de puesta a tierra.
- Describir el método de medición de resistividad de terreno e interpretación de medidas.
- Presentar los criterios y parámetros necesarios a tener en cuenta en el diseño de una puesta a tierra.
- Realizar el diseño de una puesta a tierra de media y baja tensión.

2 MALLAS A TIERRA EN SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN

Una subestación debe contar con dos puestas a tierra. Una puesta a tierra de protección y una puesta a tierra de servicio. A ambas la norma NSEG 20-78 en [9] las define como:

- **Puesta a tierra de protección:** Es la conexión directa a tierra de la carcasa de un equipo eléctrico o de una parte conductora que no forma parte del circuito, con el fin de proteger a las personas contra las tensiones de contacto o de paso demasiado altas.
- **Puesta a tierra de servicio:** Es la conexión a tierra de un punto del circuito eléctrico, en particular del punto neutro de los transformadores conectados en estrella. Se denominará directa cuando la conexión a tierra se hace sin conectar ninguna otra impedancia distinta de la puesta a tierra. Se denominará indirecta cuando se realice a través de impedancias adicionales.

En condiciones normales las corrientes que circulan a través del terreno son de magnitudes pequeñas, las cuales son generadas debido a desequilibrios de corrientes en el sistema o corrientes armónicas que se descargan a través de las puestas a tierra de servicio. Por el contrario, en el caso de existir alguna anomalía o falla en el sistema, las corrientes que circulan a través del terreno pueden alcanzar valores elevados y de carácter preocupante para las personas que circunden el sector y para el propio sistema eléctrico. Es por ello, que, en estos casos, es importante conocer cuáles son dichas magnitudes y como se distribuyen en el terreno, para poder diseñar un sistema de puesta a tierra que mitigue de manera eficiente los efectos que pongan en peligro a las personas. Garantizando así, la seguridad de las mismas y del sistema eléctrico.

2.1 Conceptos básicos

A continuación, se definen algunos conceptos básicos relacionados a las puestas a tierra y su diseño. Estos conceptos se obtuvieron de las normas eléctricas NCH Elec. 4/2003 y NSEG 20-78.

- **Electrodos de tierra:** Son conductores desnudos, enterrados, cuya finalidad es establecer contacto eléctrico con el suelo.

- **Línea de tierra:** Conductor que une el electrodo de tierra con el punto de la instalación que se quiere poner a tierra.
- **Poner a tierra:** Consiste en unir un punto del circuito de servicio o la masa de algún equipo con el suelo.
- **Puesta a tierra:** Conjunto de electrodos y líneas de tierra cuya finalidad es establecer el contacto eléctrico con el suelo.
- **Tierra de referencia:** Electrodo de tierra usado para efectos de medición o comparación, instalado en una zona del suelo, en particular de su superficie, lo suficientemente alejada del electrodo de tierra a medir o del punto de comparación, como para que no se presenten diferencias de potencial entre distintos puntos de ella.
- **Resistencia de puesta a tierra:** Valor de resistencia eléctrica medido entre un electrodo de tierra y una tierra de referencia, más la resistencia de la línea de tierra.
- **Resistividad específica de tierra:** Es la resistencia eléctrica específica del suelo en consideración; usualmente se representa como la resistencia de un cubo de arista unitaria, medida entre dos caras opuestas de él. En el sistema internacional de unidades su unidad será el $\text{Ohm} \cdot \text{m}^2/\text{m} = \text{Ohm} \cdot \text{m}$.
- **Distribución de potencial:** Es la secuencia de valores de potencial que se presenta sobre la superficie del suelo entre el electrodo de tierra y la tierra de referencia.
- **Protecciones:** Dispositivos destinados a desenergizar un sistema, circuito o artefacto cuando en ellos se alteran las condiciones normales de funcionamiento.

2.2 Diseño de mallas a tierra de media tensión

En el caso de media tensión se diseñan generalmente sistemas de electrodos en forma de mallas, debido a que esta configuración permite controlar de mejor manera la distribución del gradiente de potencial en el suelo. Esta malla es la que se utilizará como **puesta a tierra de protección**. Las partes metálicas no activas de los equipos eléctricos, como la carcasa del transformador, y toda parte metálica de la subestación, que normalmente está sin tensión pero que en situación de falla lo pudiese estar, deberán conectarse a esta puesta a tierra.

La puesta tierra de protección deberá instalarse bajo la superficie del suelo que cubre toda el área abarcada por la subestación de manera tal que asegure el control de las gradientes de potencial que aparezcan en la zona de operación. La superficie, bajo la cual se encuentre enterrada la malla, se cubrirá con una capa de grava que se extenderá 1 [m] más allá del límite del electrodo. El diseño de la puesta a tierra deberá ser de tal dimensión que asegure que los gradientes de potencial que aparezcan sobre ella o en su periferia, en caso de fallas o en condiciones normales, no superen el umbral de fibrilación cardiaca de una persona. Además, la resistencia de puesta a tierra debe ser inferior a 20 [Ω].

2.2.1 Objetivos de la puesta a tierra de protección

- Seguridad de los operadores o usuarios mediante un control de la distribución de los gradientes de potencial. Asegurándose que la tensión de paso y de contacto se mantengan bajo los niveles de fibrilación cardiaca.
- Seguridad de la instalación. Proporcionando una vía de baja resistencia de falla para una correcta operación de los elementos de protección.

2.3 Diseño de mallas a tierra de baja tensión

En el caso de la puesta a tierra de baja tensión de la subestación, esta se utilizará **únicamente** como **puesta a tierra de servicio**. Se instalará en el poste contiguo a la subestación, conectándose a ella el conductor neutro de la conexión en estrella del transformador. Se diseñará de modo tal que, en caso de circulación de una corriente de falla permanente, la tensión de cualquier conductor activo con respecto a tierra no sobrepase los 250 [v]. Para ello el conductor neutro de la red eléctrica de baja tensión se conectará en diferentes puntos a la puesta a tierra de servicio, teniendo como límite una distancia máxima de 200 [m] entre cada una de

las conexiones que se deben realizar a tierra. La configuración de electrodos usual es en forma de mallas, dado a que posee la característica de reducir notablemente la resistencia de puesta a tierra, no obstante, dado el espacio disponible de implementación y la resistividad del suelo, se suelen usar otras disposiciones de electrodos como barras horizontales, barras verticales, entre otros. La resistencia independiente de cada una de las puestas a tierra de servicio debe tener un valor menor a 20 [Ω]. Sin embargo, se exige por norma que la resistencia de puesta a tierra resultante de la combinación de todas las puestas a tierra de servicio sea menor a 5 [Ω].

2.3.1 Objetivos de la puesta a tierra de servicio

- Correcto funcionamiento de los elementos de protección de baja tensión. Proporcionando una vía de baja resistencia de falla.
- Proporcionar un nivel de referencia cero de voltaje en el neutro de los transformadores de distribución.

3 RESISTIVIDAD DEL SUELO

Un sistema de puesta a tierra debe presentar el menor valor de resistencia posible frente a la circulación de una corriente de defecto. Esta resistencia, principalmente depende de las características que tiene el terreno en el cual van a ser enterrados los electrodos de la puesta a tierra y es por ello que se hace necesario conocer la resistividad que tiene el terreno en el cual se desea diseñar la puesta a tierra.

3.1 Principales factores que determinan la resistividad del suelo

Algunos de los principales factores que influyen en la resistividad del terreno y que se presentan en [1], [4] y [5] son lo que a continuación se desarrollan.

3.1.1 Humedad

En zonas de escasa humedad las resistividades tienden a ser muy altas. A mayor grado de humedad la resistividad disminuye, sin embargo, con valores de humedad sobre el 15%, la disminución de la resistividad no es tan notoria.

3.1.2 Temperatura

La resistividad del suelo aumenta a medida que disminuye la temperatura. Para valores bajo los 0°C la resistividad aumenta de manera notoria debido a la congelación del agua. Para valores cercanos a los 100°C se produce la evaporación del agua, lo cual implica que se reduzca la humedad y por ende aumente la resistencia del terreno.

3.1.3 Sales solubles

Debido a la conducción electrolítica que presentan las sales disueltas en agua, a mayor concentración de sales solubles menor será la resistividad del terreno.

3.1.4 Granulometría:

Influye sobre la porosidad, el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad del terreno con el mayor tamaño de los granos.

3.1.5 Compactación:

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo.

3.1.6 Estratificación del suelo

Generalmente los terrenos se componen por diferentes estratos (capas) los cuales se conforman de diferentes materiales que hacen que la resistividad varíe entre cada uno de ellos. Dichos estratos pueden representarse por una sucesión de capas uniformes y horizontales distribuidas verticalmente. A esta distribución se le conoce como “corte geoelectrico”.

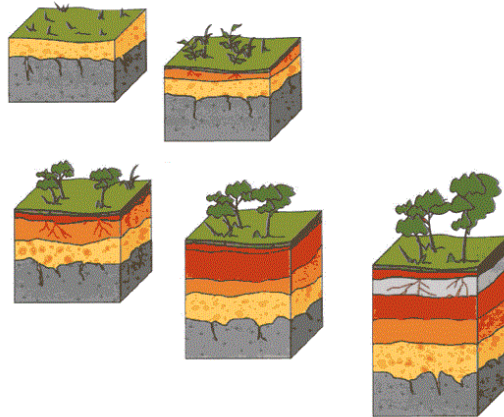


Figura 3.1 Estratificación del suelo.

La resistividad total de un terreno es la resultante de la combinación de las diversas capas que lo constituyan. Por lo tanto, será necesario conocer estos valores, los cuales se obtienen mediante el método del sondeo eléctrico vertical, que se desarrollará más adelante. Dicho método permite obtener la estratificación

del terreno, es decir, la cantidad de capas presentes, la resistividad y el espesor de cada una de ellas.

Conocer el valor de la resistividad del suelo es lo principal para saber que configuración de diseño de puesta a tierra resulta ser la más adecuada según el caso de estudio.

3.2 Medida de la resistividad del suelo

El **sondeo eléctrico vertical** (SEV) es el método más utilizado para para el estudio de resistividad de terrenos. Utiliza el método de los cuatro electrodos y consiste en inyectar una corriente eléctrica en el suelo a través de dos de esos electrodos y medir la diferencia de potencial eléctrico que se genera en los otros dos.

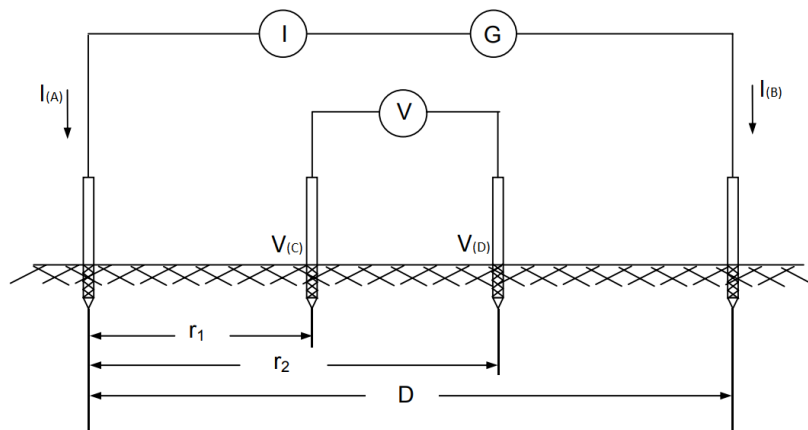


Figura 3.2 Esquema general de medición de la resistividad mediante el método de los cuatro electrodos.

Las corrientes eléctricas inyectadas al terreno mediante los electrodos producirán 2 campos eléctricos semiesféricos en el suelo (cada electrodo genera un campo eléctrico independiente). Considerando que ambas corrientes inyectadas poseen la misma amplitud, pero con sentido opuesto, y sobreponiendo los efectos de ambos electrodos que inyectan corriente, se tiene que, como se indica en [1], la diferencia de potencial $v_{(C)} - v_{(D)}$ se obtiene de la siguiente ecuación:

$$V_{(C)} - V_{(D)} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left(\frac{1}{D - r_2} - \frac{1}{D - r_1} \right) \right] \quad (3.1)$$

Dónde ρ corresponde a la resistividad e I a la magnitud de la corriente inyectada. D , r_1 y r_2 corresponden a la distancia entre los electrodos como se indica en la figura 3.2

Si se toma en cuenta que la diferencia de potencial $V_{(C)} - V_{(D)}$ es la tensión medida por el voltímetro situado entre los electrodos interiores (la cual se denomina simplemente V), despejando la resistividad ρ de la ecuación 3.1 se tiene que la resistividad obtenida mediante el método de los cuatro electrodos corresponde a:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{I} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left(\frac{1}{D - r_2} - \frac{1}{D - r_1} \right)} \right] \quad (3.2)$$

Dicha resistividad, a menos que el terreno sea homogéneo, no corresponderá a ninguna de las resistividades presentes en el suelo específicamente, si no que a una combinación de ellas. A este valor se le denomina “resistividad aparente”. Solamente en el caso que el terreno donde se realiza la medida sea homogéneo este valor obtenido de resistividad corresponderá al valor único de resistividad presente en el suelo. Por lo tanto, es necesario realizar una serie de medidas de resistividad aparente a distintas distancias cada una, para luego interpretarlas mediante el uso de la curvas patrón que se presenta más adelante, y finalmente obtener la estratificación presente en el terreno con los espesores y resistividades correspondientes.

Según se desplacen los electrodos a medida que se obtienen las diferentes muestras de resistividad aparente, se definirá la configuración empleada. Existen 2 tipos de configuraciones comúnmente usadas, la configuración de Schlumberger y la configuración de Wenner.

3.2.1 Método de Schlumberger

Para esta configuración los electrodos se sitúan en línea recta. Los dos electrodos de potencial (electrodos interiores) se sitúan de manera simétrica respecto a un eje o punto de medición previamente escogido, a una distancia de separación de 1 metro entre ellos. Los electrodos de corriente (electrodos exteriores) también se ubicarán de manera simétrica entre sí, con respecto al punto

de medición. En este método los electrodos de tensión permanecen fijos durante todo el estudio. En cambio, los electrodos de corriente se desplazarán cierta distancia respecto al punto de medición por cada una de las medidas que se requieran tomar para el estudio de sondeo eléctrico vertical.

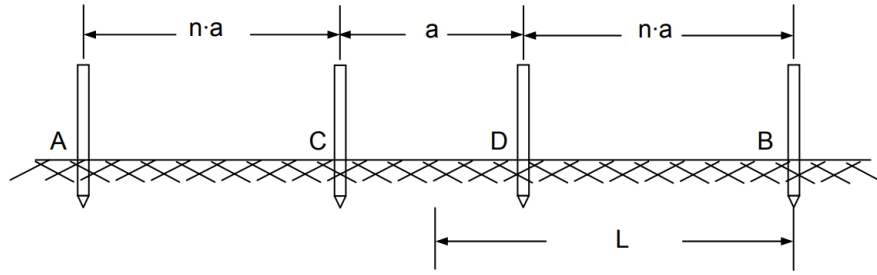


Figura 3.3 Configuración Schlumberger.

Considerando las distancias r_1 , r_2 y D de la figura 3.2 se definen:

$$r_1 = D - r_2 = na \quad (3.3)$$

$$r_2 = D - r_1 = na + a = a(n + 1) \quad (3.4)$$

Reemplazando las igualdades anteriores en la ecuación 3.2 mencionada en el apartado anterior, se tiene que la ecuación para obtener la resistividad aparente para el caso de Schlumberger es:

$$\rho = \pi \cdot R \cdot a \cdot n \cdot (n + 1) \quad (3.5)$$

Donde $R = \frac{V}{I}$ se obtiene de los valores obtenidos mediante la medida de tensión en los electrodos y la corriente inyectada por los otros dos.

3.2.2 Método de Wenner

En esta configuración, al igual que en la de Schlumberger, los 2 electrodos exteriores se conectan a los terminales de corriente y los otros 2 electrodos interiores se conectan a los de potencial. Los electrodos se disponen en línea recta y equidistantes simétricamente al eje de medición. Se sitúan a una distancia de “a” metros entre sí. A diferencia con la configuración anterior, en este caso, ningún electrodo se mantiene fijo en las diferentes medidas que se realizan para el estudio. Lo que se hace en esta configuración es ir variando la distancia “a” entre los electrodos para obtener los valores de resistividad aparente necesarios para el estudio del terreno.

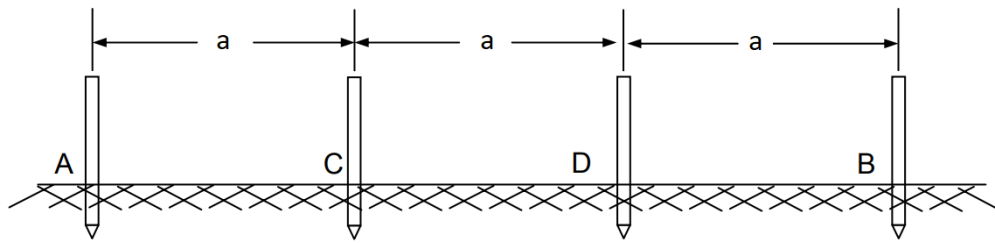


Figura 3.4 Configuración Wenner.

En estas condiciones la fórmula para obtener la resistividad aparente mediante la configuración de Wenner queda de la siguiente manera:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (3.6)$$

3.2.3 Consideraciones

Para poder llevar a cabo el estudio, ya sea que se utilice la configuración Wenner o la Schlumberger, se debe elegir un eje de medición en línea recta sobre el suelo, situado en una dirección en la cual no se presenten obstáculos importantes que dificulten la medición (rocas, edificios, etc.). Sobre este eje se debe elegir un centro de medición el cual se puede marcar con una estaca auxiliar.

Lo ideal es realizar el sondeo en el terreno mismo en el cual se piensa realizar la puesta a tierra una vez que el terreno ya ha sido despejado. Alejado de zonas con pendientes pronunciadas ya que estas podrían inducir errores en la

interpretación de los datos obtenidos, de no ser posible, es recomendable realizar el estudio en una línea perpendicular a la dirección de la pendiente lo más lejos posible de esta.

Una vez definido el eje y centro de medición se procede a realizar las medidas mediante una de las dos configuraciones presentadas. Para la secuencia de medidas que se desean obtener la separación de los electrodos que se utiliza aproximadamente (esto es opcional) en metros es: 0,5 – 0,6 – 0,8 – 1,0 – 1,2 – 1,6 – 2,0 – 2,5 – 3,0 – 4,0 – 5,0 – 6,0 – 8,0 – 10 – 12 – 16 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 etc. Dicha distancia corresponde a “L” en el caso de Schlumberger o “a” en el caso de Wenner. Los datos obtenidos para cada medida se deben insertar en una hoja de terreno similar a los de las tablas 3.1 y 3.2, calculando la resistencia aparente por las ecuaciones 3.5 o 3.6 según sea el caso, además se indican otros detalles como el lugar de medición y las condiciones climáticas en las cuales se está realizando el estudio.

La profundidad a la que se entierran los electrodos para las primeras distancias de mediciones, las cuales son pequeñas, se recomienda en [4] que sea menor a 0,1[m]. Y Para separaciones mayores se entierran a aproximadamente 0,3 [m].

Tabla 3.1 Hoja de terreno para método Schlumberger.

Nombre del proyecto:						
Lugar de medición:						
Profesional a cargo:						
Fecha:						
Condiciones climáticas:						
Cantidad de muestras:						
Método utilizado:						
Instrumento utilizado:						
Escala del instrumento:						
N	L [m]	a [m]	R [Ω]	n	n+1	ρ [Ω m]
1	1,5	1		1,0	2,0	
2	2,0	1		1,5	2,5	
3	2,5	1		2,0	3,0	
4	3,5	1		3,0	4,0	
5	4,5	1		4,0	5,0	
6	5,5	1		5,0	6,0	
7	10,5	1		10,0	11,0	
8	15,5	1		15,0	16,0	
9	20,5	1		20,0	21,0	
10	30,5	1		30,0	31,0	
11	40,5	1		40,0	41,0	
12	50,5	1		50,0	51,0	

Tabla 3.2 Hoja de terreno para método Wenner.

Nombre del proyecto:			
Lugar de medición:			
Profesional a cargo:			
Fecha:			
Condiciones climáticas:			
Cantidad de muestras:			
Método utilizado:			
Instrumento utilizado:			
Escala del instrumento:			
N	a[m]	R [Ω]	ρ [Ω m]
1	1		
2	2		
3	3		
4	4		
5	5		
6	7		
7	10		
8	15		
9	20		
10	30		
11	40		
12	50		

3.3 Instrumento utilizado para llevar a cabo el SEV

Para poder realizar las medidas necesarias para el estudio del SEV el instrumento a utilizar es el geóhmetro. Los cuales son instrumentos portátiles que incluyen una fuente de poder que permite inyectar corriente al terreno y mediante circuitos electrónicos poder obtener de manera directa el cociente entre la tensión medida y la corriente inyectada. En general los geóhmetros cuentan con 4 terminales, C1 y C2 en los cuales se conectan los electrodos inyector de corriente y los terminales P1 y P2 donde se ubican los electrodos que miden el potencial. Algunos instrumentos solo permitirán desarrollar un tipo de configuración, Wenner o Schlumberger, y otros ambas. El valor que entregará en pantalla el instrumento corresponderá a la resistencia R (cociente entre la tensión medida y la corriente inyectada) y mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6 se obtendrán los valores de resistividad aparente para cada medida según la configuración que se esté utilizando.



Figura 3.5 Geóhmetros Megger: DET2/3 y DET4TCR.

4 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES

El método utilizado para la interpretación de las mediciones es el denominado de las “Curvas Patrones”. Consiste en comparar una gráfica confeccionada a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos del terreno, con las gráficas presentadas por Ernesto Orellana y Harold Mooney en su publicación “*Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding Over Layered Structures*”.

4.1 Clasificación de las curvas patrones

Las curvas patrones de resistividad aparente presentes en [10] se pueden clasificar según el número de capas que componen el terreno y subdividirse según la variación de la resistividad que presentan las capas entre sí.

4.1.1 Curvas de dos capas

Las curvas patrones presentan una familia de curvas de dos capas con 25 casos posibles. Puede darse el caso donde la resistividad del estrato superior es mayor que la del inferior $\rho_1 > \rho_2$ o el caso contrario $\rho_1 < \rho_2$.

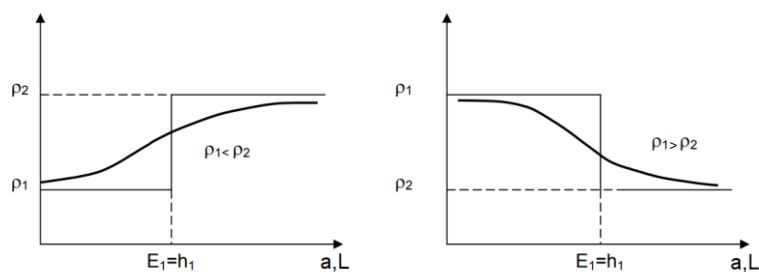


Figura 4.1 Curvas de dos estratos.

4.1.2 Curvas de tres capas

Existen 76 familias de curvas patrones para un terreno de 3 estratos con un total de 912 curvas. Se agrupan en 4 tipos según se relacionan las resistividades de los estratos (a pesar de que existen 6 posibles combinaciones de resistividades):

- Tipo H: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, incluye los subtipos: $\rho_1 > \rho_3 > \rho_2$ y $\rho_3 > \rho_1 > \rho_2$
- Tipo K: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, incluye los subtipos: $\rho_2 > \rho_1 > \rho_3$ y $\rho_2 > \rho_3 > \rho_1$
- Tipo A: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
- Tipo Q: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

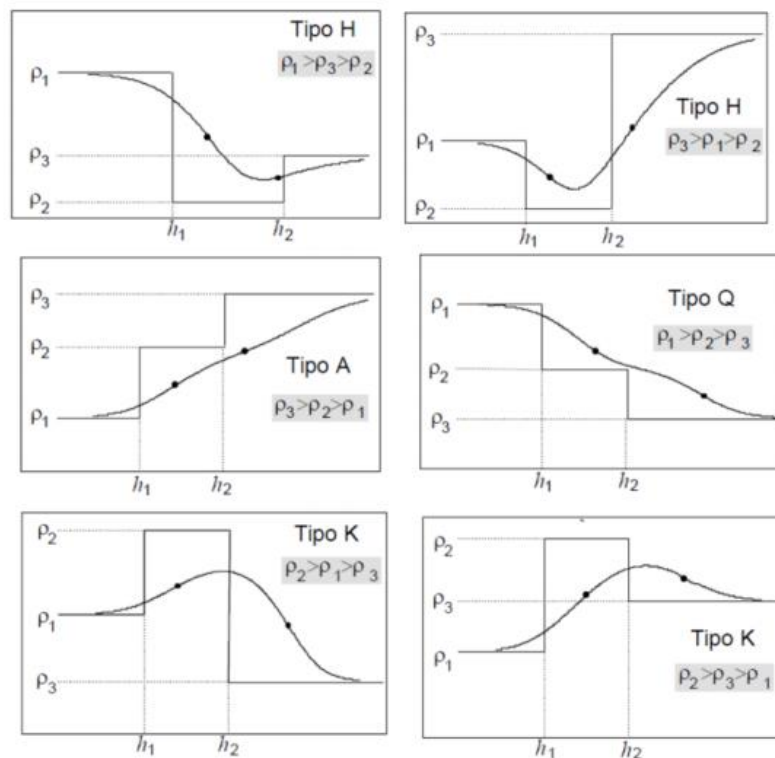


Figura 4.2 Curvas de tres estratos.

4.1.3 Curvas de cuatro capas

Se presentan 30 familias de curvas patrones para un terreno de cuatro capas con 480 curvas en total. Señalar que estas curvas están disponibles solo para la configuración Schlumberger y **no** para el caso de configuración Wenner. Existen 24 posibles combinaciones de curvas de resistividad y se agrupan en 8 tipos:

- Tipo HK: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$, incluye 5 subtipos.
- Tipo HA: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$, incluye 3 subtipos.
- Tipo KH: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$, incluye 5 subtipos.
- Tipo KQ: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$, incluye 3 subtipos.
- Tipo AA: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$, incluye 1 subtipo.
- Tipo AK: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$, incluye 3 subtipos.
- Tipo QH: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$, incluye 3 subtipos.
- Tipo QQ: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$, incluye 1 subtipo.

4.2 Procedimiento

Para poder llevar a cabo la comparación de las curvas es necesario crear una gráfica representativa de las mediciones del suelo obtenidas con el instrumento en el terreno. Ubicando en el eje de las abscisas (eje horizontal) la distancia de separación “L”, para la configuración Schlumberger, o “a” para la configuración Wenner. Y en la ordenada (eje vertical) se debe ubicar el valor de la resistividad aparente obtenido para cada una de las distancias de separación. Los datos se deben graficar sobre un papel logarítmico de igual dimensión de década que la curva patrón a utilizar. Para la disposición Schlumberger la medida es de 62.5 mm/década y para la disposición Wenner es de 84.6 mm/década. La tabla 4.1 presenta una serie de medidas obtenidas en terreno mediante configuración Schlumberger y con la ecuación 3.5 se obtuvo la resistencia aparente para cada una de ellas.

Tabla 4.1 Medidas de terreno, configuración Schlumberger.

Tabla de terreno						
N	L [m]	a [m]	R [Ω]	n	n+1	ρ [Ω m]
1	1,5	1	49,231	1,0	2,0	309,318
2	2,0	1	21,578	1,5	2,5	254,202
3	2,5	1	11,000	2,0	3,0	207,339
4	3,5	1	3,512	3,0	4,0	132,395
5	4,5	1	1,776	4,0	5,0	111,586
6	5,5	1	1,078	5,0	6,0	101,596
7	10,5	1	0,348	10,0	11,0	120,257
8	15,5	1	0,217	15,0	16,0	163,609
9	20,5	1	0,186	20,0	21,0	245,414
10	30,5	1	0,170	30,0	31,0	496,671
11	40,5	1	0,111	40,0	41,0	571,879

La gráfica de terreno representativa de la tabla 4.1 es la que se muestra en la figura 4.3.

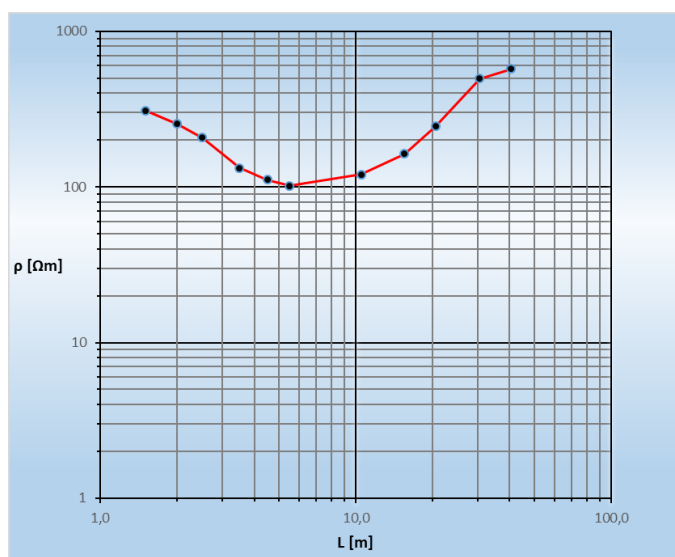


Figura 4.3 Gráfica de terreno.

En [5] se indica que una vez realizada la curva lo conveniente es identificar la cantidad de estratos que hay presentes en el terreno estudiado y como varía la resistividad entre ellos para así poder seleccionar la familia de curvas patrón

establecidas más conveniente para comparar. Esto se logra ubicando los puntos de inicio y término de la curva de terreno y los puntos intermedios en los cuales cambia de sentido. Se determina el número de capas y la variación de resistividad que existe entre las capas como se muestra en la figura 4.4.

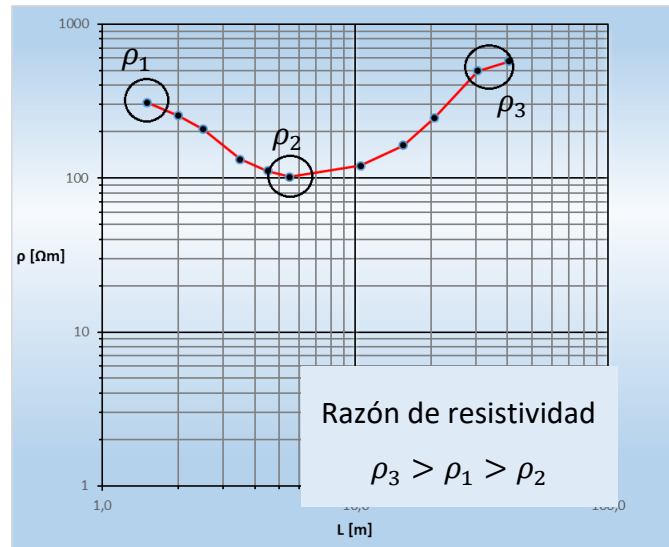


Figura 4.4 Determinación de la razón de resistividad entre capas.

En la gráfica de terreno de la figura 4.4 se puede determinar que la familia de curvas representativa es la de tipo H ($\rho_3 > \rho_1 > \rho_2$) para tres estratos. Por lo tanto, hay que buscar en esa familia de curvas la que más se asemeje visualmente y proceder a sobreponer la gráfica obtenida en terreno con las presentadas por Orellana y Mooney en [10]. En todo momento se deben mantener paralelos los ejes de coordenadas de las curvas patrón con respecto a las de la curva de terreno. Se debe seleccionar la curva patrón más parecida. Luego marcar sobre el gráfico de terreno la cruz correspondiente al origen de la familia de curvas en que se encuentra la curva patrón seleccionada (cruz de campo). Se extiende la cruz de campo hacia los ejes, la intersección con la abscisa corresponde al espesor de la primera capa y la intersección con la ordenada corresponde a la resistividad de la misma. Además, se deben identificar y obtener los datos que se muestran en la figura 4.5.

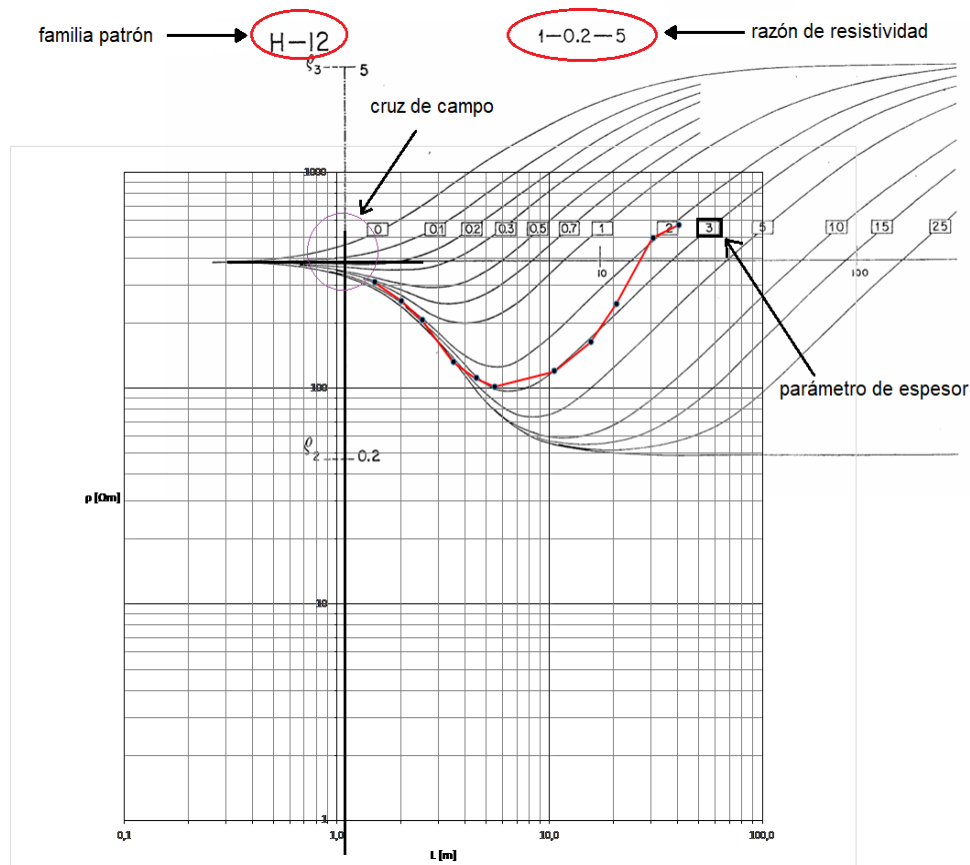


Figura 4.5 Comparación de curva terreno con curva patrón.

La **razón de resistividad** corresponde a los factores por los cuales se tendrá que multiplicar la resistividad del primer estrato y cuyos resultados corresponderán a las resistividades de las otras capas presentes en el terreno.

Los **parámetros de espesor** son los factores por los cuales se multiplica el espesor de la primera capa para así obtener el espesor de las capas inferiores. El **espesor de la última capa siempre se supone infinito**. En algunas de las curvas de cuatro capas habrá una letra que identifica a cada curva. Esta letra se debe buscar en una lista que está presente dentro de la misma gráfica con los parámetros de espesores correspondientes.

La multiplicación de la razón de resistividad y los parámetros de espesor para el caso en estudio se llevan a cabo como se muestra en la tabla 4.2.

Por lo tanto, de la figura 4.5 se obtienen los siguientes datos:

- Resistividad y espesor del primer estrato: $\rho_1 = 385 [\Omega m]$ y $E_1 = 1,2 [m]$

- Factores de resistividad: $K_{\rho 1} = 1$, $K_{\rho 2} = 0,2$ y $K_{\rho 3} = 5$
- Factores de espesor: $K_{E2} = 3$

Entonces, la estratificación para el terreno estudiado y representado por la gráfica de la figura 4.3 es la que se indica en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Estratificación del suelo para la gráfica de terreno de la figura 4.3.

$\rho \ [\Omega \cdot m]$	$E \ [m]$	$h \ [m]$
$\rho_1 = 385 \ [\Omega \cdot m]$	$E_1 = 1,2 \ [m]$	$h_1 = 1,2 \ [m]$
$\rho_2 = \rho_1 \cdot K_{\rho 2} = 77 \ [\Omega \cdot m]$	$E_2 = E_1 \cdot K_{E2} = 3,6 \ [m]$	$h_2 = 4,8 \ [m]$
$\rho_3 = \rho_1 \cdot K_{\rho 3} = 1925 \ [\Omega \cdot m]$	$E_3 = \infty \ [m]$	$h_3 = \infty \ [m]$

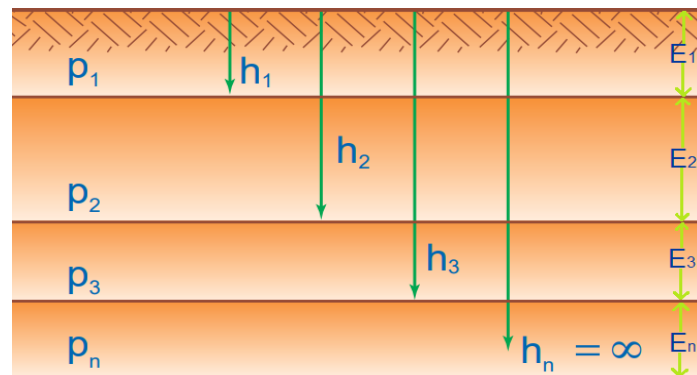


Figura 4.6 Estratificación de un terreno.

5 RESISTIVIDAD EQUIVALENTE

Mediante el método de las curvas patrones se logra obtener las dimensiones de grosor y resistencia de cada uno de los estratos presentes en el terreno. Sin embargo, para poder determinar el valor de la resistencia teórica de una puesta a tierra es necesario obtener una “resistividad equivalente” la cual represente en una variable única la combinación de las resistividades de las diferentes capas de terreno.

Para poder llevar a cabo el cálculo de la resistividad equivalente del terreno existen diferentes métodos. Uno de los métodos propone determinar la resistividad equivalente como el promedio entre las resistividades de los diferentes estratos presentes en el terreno en estudio, sin embargo, este método se considera poco efectivo y solo es recomendable usarlo en el caso de no poder usar otro método a causa de la indeterminación de alguna de las ecuaciones o algo similar. El método más utilizado es el método de Burgsdorf-Yakobs que se desarrolla a continuación.

5.1 Método de Burgsdorf-Yakobs

Este método propone que una puesta a tierra compuesta por un conjunto de conductores horizontales en forma de malla enterrados a una profundidad “ h ” y un conjunto de barras verticales de longitud “ L_r ” se aproxima a un prisma metálico recto en la medida que se incrementa el número de elementos verticales y su resistencia disminuye en forma asintótica hasta un valor mínimo. Este prisma metálico puede aproximarse a un semielipsoide de revolución ubicado a partir de la superficie del terreno. Dicho semielipsoide cubre una superficie “ S ” igual a la que cubre la puesta a tierra y su eje menor “ b ” es igual a la profundidad máxima alcanzada por los electrodos. La disposición de este tipo de puesta a tierra y sus dimensiones se pueden observar en la figura 6.5. La puesta a tierra puede o no contar con barras verticales enterradas, de no ser así los parámetros referidos a estas se consideran nulos.

Por lo tanto, este método emplea los parámetros y expresiones que se definen a continuación:

h : profundidad a la que se encuentra enterrada la malla [m].

L_r : longitud de las barras enterradas [m].

ρ_i : resistividad del estrato “ i ”, supuesto uniforme [$\Omega \cdot m$].

h_i : profundidad desde la superficie al término del estrato “ i ” [m]. Ver figura 4.6.

$S = L_x \cdot L_y$: área que cubre el perímetro del electrodo de tierra [m²]. Ver figura 6.5.

b : máxima profundidad de conductor enterrado, medida desde la superficie [m].

$$b = h + L_r \quad (5.1)$$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (5.2)$$

$$r_0 = \sqrt{r^2 - b^2} \quad (5.3)$$

$$q_0 = \sqrt{2r(r + b)} \quad (5.4)$$

$$u_i = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_i^2} \quad (5.5)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{1}{2}(u_i^2 - \sqrt{u_i^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} \quad (5.6)$$

$$F_i = \sqrt{1 - \left(\frac{v_i}{r_0}\right)^2} \quad (5.7)$$

Los factores u_i , v_i y F_i se calculan para la cantidad de estratos presentes en el terreno.

Finalmente, la resistividad equivalente del terreno en ohm - metro se obtiene de la siguiente expresión:

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{(F_i - F_{i-1})}{\rho_i}} [\Omega \cdot m], \text{ con } F_0 = 0 \quad (5.8)$$

6 PUESTAS A TIERRA SEGÚN LA DISPOSICIÓN DE LOS ELECTRODOS

A continuación, se presentan algunas de las puestas a tierra más comunes y sus respectivas expresiones (presentes en [2], [4], [5] y [6]) para obtener la resistencia de puesta a tierra para cada una. La puesta a tierra de protección siempre tendrá una configuración de malla. Para la puesta a tierra de servicio la malla es ideal por reducir la resistencia de puesta a tierra, sin embargo, en ocasiones se puede usar otra configuración de los electrodos.

6.1 Barra vertical

La disposición del electrodo en forma de barra vertical es la más común cuando no se requiere controlar los potenciales de superficie. La barra suele ser de cobre puro o de acero recubierto de cobre. La barra de acero recubierto se suele utilizar cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero ofrece una alta resistencia mecánica.

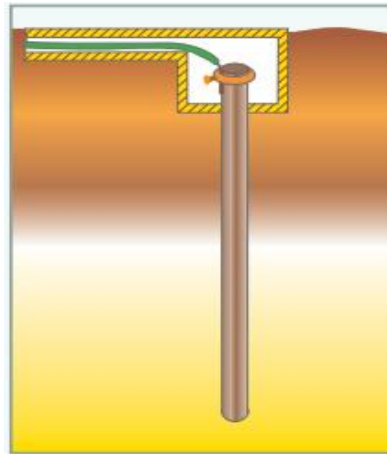


Figura 6.1 Barra vertical.

La resistencia de esta puesta a tierra se determina por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho_{eq}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 \right] [\Omega] \quad (6.1)$$

Donde:

ρ_{eq} : resistividad equivalente del terreno [$\Omega \cdot m$].

l : longitud del largo de la barra [m].

a : radio de la barra [m].

6.2 Conjunto de barras verticales

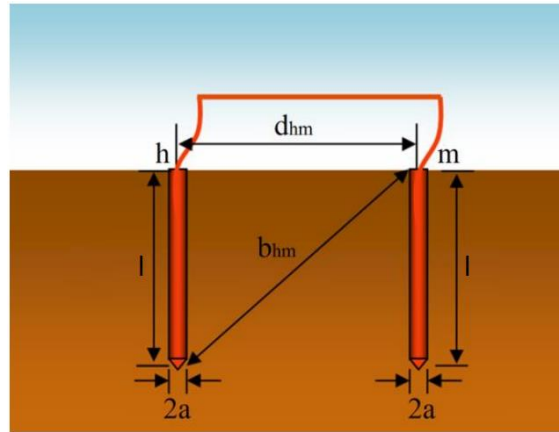


Figura 6.2 Conjunto de barras verticales.

La resistencia de puesta a tierra de un conjunto de barras verticales, enterradas a cierta profundidad y unidas entre sí mediante un conductor cuya resistencia es despreciable, se determina mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (6.2)$$

Donde:

R_i : resistencia de cada barra considerando la resistencia propia y la mutua [Ω].

$$R_i = R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq i}^n R_{hm} \quad (6.3)$$

Donde:

R_{hh} : resistencia propia de cada barra [Ω].

R_{hm} : resistencia mutua entre las barras [Ω].

$$R_{hh} = \frac{\rho_{eq}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 \right] \quad (6.4)$$

Donde:

l : longitud del largo de la barra [m].

a : radio de la barra [m].

$$R_{hm} = \frac{\rho_{eq}}{4 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{(b_{hm} + l)^2 - d_{hm}^2}{d_{hm}^2 - (b_{hm} - l)^2} \right) \right] \quad (6.5)$$

Donde:

d_{hm} : longitud entre dos barras [m].

b_{hm} : longitud entre un extremo inferior de una barra y un extremo superior de otra barra [m].

6.3 Electrodo horizontal

En este caso se supone un conductor horizontal enterrado a una determinada profundidad:

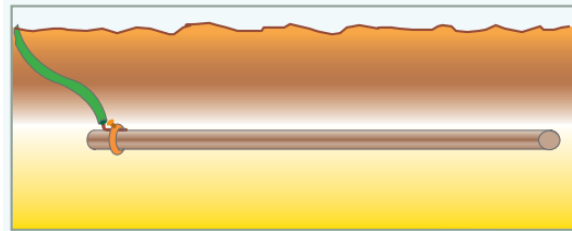


Figura 6.3 Electrodo horizontal.

La ecuación para obtener la resistencia de puesta a tierra se presenta a continuación:

$$R = \frac{\rho_{eq}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2l^2}{a \cdot h} \right) - 2 + 2\frac{h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2l^4} \dots \right] \quad (6.6)$$

Donde:

l : longitud total del conductor enterrado [m]

a : radio del conductor enterrado [m]

h : profundidad a la que se entierra el electrodo [m]

6.4 Mallas de tierra

Este tipo de puesta a tierra consiste en un reticulado formado por conductores horizontales unidos y, normalmente, dispuestos en direcciones perpendiculares entre sí, separados de manera uniforme. Se utiliza cuando lo que se busca es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno. Una ventaja de esta configuración es que se pueden obtener valores mucho más pequeños de resistencia, pero el costo de implementación es mayor.

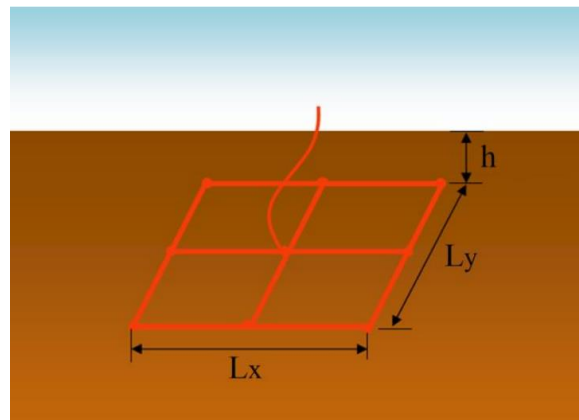


Figura 6.4 Malla de puesta a tierra

Para calcular la resistencia presente en este tipo de configuración existen diferentes métodos. Entre ellos se encuentra el método de Laurent y el método de Schwarz.

6.4.1 Método de Laurent

Este método no se considera muy exacto, ya que los parámetros que toma en consideración son solamente los referidos a la longitud del conductor que conforma la puesta a tierra y el radio equivalente de la malla. Sin embargo, se considera de utilidad para tener una primera aproximación de la resistividad de la puesta a tierra. El cálculo de la resistencia de la malla de puesta a tierra se realiza mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{\rho_{eq}}{4\sqrt{S/\pi}} + \frac{\rho_{eq}}{L_c} \quad (6.7)$$

Donde:

ρ_{eq} : resistividad equivalente del terreno [ohm-m]

S : superficie que cubre la malla [m²]

L_c : longitud total de conductor de la malla [m]

6.4.2 Método de Schwarz

Este método es más exacto que el de Laurent, dado que considera más variables características de la malla, los datos referidos al terreno y la profundidad que tiene la malla con respecto a este. La expresión que permite realizar el cálculo de la resistencia a través de este método es la siguiente:

$$R = \frac{\rho_{eq}}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{h \cdot d}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{S}} - K_2 \right] \quad (6.8)$$

Donde:

ρ_{eq} : resistividad equivalente del terreno [ohm-m]

L_c : longitud total de conductor de la malla [m]

h : profundidad a la que se entierra la malla [m]

d : diámetro del conductor de la malla [m]

S : superficie que cubre la malla [m²]

Los coeficientes K_1 y K_2 se obtienen por las siguientes expresiones:

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3 \cdot h}{\sqrt{S}} - \left[0,044 \cdot \left(\frac{A}{B} \right) \right] \quad (6.9)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8 \cdot h}{\sqrt{S}} + \left[\left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \right) \cdot \left(\frac{A}{B} \right) \right] \quad (6.10)$$

Donde:

A: longitud del lado de mayor dimensión de la malla [m]

B: longitud del lado de menor dimensión de la malla [m]

6.5 Mallas a tierra con barras verticales

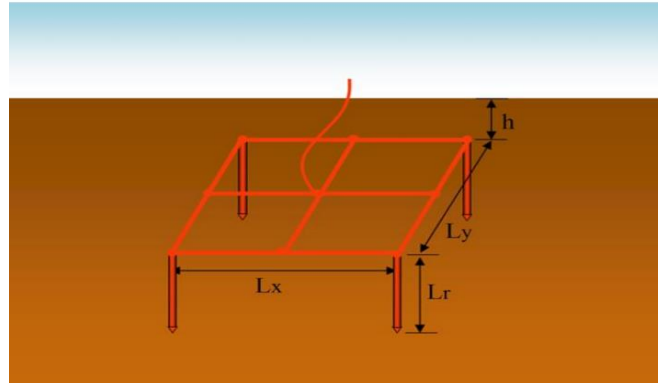


Figura 6.5 Malla de puesta a tierra con barras verticales.

El valor de la resistencia de puesta a tierra del conjunto de electrodos se determina por:

$$R = \frac{R_{malla} \cdot R_{barras} - R_m^2}{R_{malla} + R_{barras} - 2 \cdot R_m} \quad (6.11)$$

Donde:

R_{malla} : resistencia de puesta a tierra de la malla [Ω]. Calculada mediante el método de Schwarz (6.4.2).

R_{barras} : resistencia de puesta a tierra del conjunto de barras [Ω]

R_m : resistencia mutua entre las barras verticales y la malla [Ω]

- Para las barras:

$$R_{barras} = \frac{\rho_{eq}}{2 \cdot \pi \cdot N_r \cdot L_r} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L_r}{\frac{d_b}{2}} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L_r}{\sqrt{S}} \cdot (\sqrt{N_r} - 1)^2 \right] \quad (6.12)$$

Donde:

L_r : longitud de cada barra [m].

d_b : diámetro de cada barra [m].

N_r : número de barras instaladas en el área que cubre la malla.

K_1 : coeficiente que se obtiene del método de Schwarz para mallas.

- La resistencia mutua entre las barras verticales y la malla de tierra se obtiene de la siguiente expresión:

$$R_m = \frac{\rho_{eq}}{\pi \cdot L_c} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (6.13)$$

7 INFLUENCIA DE LA CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO Y CONDICIONES DE SEGURIDAD

En situaciones normales la corriente que circula a través de la puesta a tierra puede deberse principalmente a desequilibrios que se presentan entre las fases y la presencia de 3ª armónica en el caso de los transformadores con el neutro conectado a tierra. Estas corrientes suelen ser pequeñas y no presentan riesgo para las personas que transitan en los alrededores de la puesta a tierra. Sin embargo, en el caso de que se presente una falla y exista circulación de una corriente a través de una malla de puesta a tierra, aparecerán diferencias de potencial en el terreno y en las estructuras metálicas conectadas a la misma, las cuales si presentarán un riesgo para las personas que transitan o trabajan sobre la malla de tierra o en los alrededores de esta. Es por ello la necesidad de tener en cuenta cuales son dichas tensiones y considerarlas dentro del diseño de la puesta a tierra para limitarlas a magnitudes que no presenten un riesgo severo para las personas [1] y [3].

7.1 Efectos de la corriente en el cuerpo humano

7.1.1 Efecto de la frecuencia

A corrientes eléctricas de 50 o 60 [Hz] los seres humanos son muy vulnerables. Una corriente de 0,1 [A] puede ser letal. Los estudios indican que el cuerpo humano puede tolerar un poco más de 25 [Hz]. Y para frecuencias de 3 a 10 [kHz] la corriente tolerada puede ser aún mayor.

7.1.2 Umbral de percepción

El umbral de percepción corresponde a la magnitud mínima de corriente que una persona es capaz de percibir. Se presenta una ligera sensación de hormigueo en las manos o dedos y dicha magnitud depende de diversos factores como el área de contacto, características fisiológicas de la persona, entre otros. Por lo tanto, es difícil determinar de manera exacta la magnitud de esta corriente. Según la norma IEC 60479-1 el umbral de percepción se considera a los 0,5 [mA]. Otros estudios sugieren una corriente de 1 [mA] como umbral de percepción.

7.1.3 Umbral de no soltar o corrientes de abandono

Existen magnitudes de corriente los cuales, a pesar de ser influyentes en el cuerpo humano, no impiden tener la capacidad de control sobre los músculos y poder soltar el objeto energizado. Mediante un experimento realizado por Dalziel se obtuvo un promedio de corriente de abandono de 10,5 [mA] para las mujeres y 16 [mA] para los hombres. Los valores límites para dicha corriente se determinaron de 6 [mA] para las mujeres y 9 [mA] para los hombres.

Para corrientes superiores se puede hacer difícil o imposible liberar objetos energizados debido a la contracción muscular que provoca el paso de la corriente. Pudiendo incluso dificultar la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen al momento de interrumpir la corriente, aunque en algunos casos es necesario aplicar reanimación cuando se detiene la respiración durante un tiempo.

7.1.4 Umbral de fibrilación ventricular

Corresponde al valor mínimo de corriente que provoca fibrilación ventricular, paro del corazón, o la inhibición de la respiración generando lesiones o la muerte. Es por ello la importancia de tener en cuenta este umbral en el diseño de la puesta a tierra, para mantener las corrientes de falla que puedan circular por el cuerpo humano por debajo de este valor, evitando así lesiones o la muerte de las personas.

Estudios realizados por Dalziel y Lee suponen que el 99,5% de todas las personas pueden soportar, sin fibrilación ventricular, el paso de una corriente (de 50 o 60 [Hz]) de magnitud y duración determinada por:

$$I_{ch} = \frac{K}{\sqrt{t_d}} \quad (7.1)$$

Donde:

I_{ch} : magnitud rms de la corriente a través del cuerpo humano [A]

t_d : tiempo de duración de la exposición a la corriente [s]

$K = \sqrt{S_{ch}}$, S_{ch} es la constante empírica relacionada con la energía de choque eléctrico tolerado por un cierto porcentaje de una población determinada.

Según Dalziel K tiene un valor de 0,116 para una persona de 50 [kg] en pruebas de un rango entre 0,03 [s] y 3 [s]. La constante K tiende a aumentar en el caso de que el peso aumente, para una persona de 70 [kg], K es igual a 0,157. El valor de K a utilizar para estimar la corriente I_{ch} será el estimado para una persona de 50 [kg], para así situarse en un caso pesimista, sin embargo, si se estima que el valor promedio de la población es diferente podría utilizarse otro valor de K . Por lo tanto, la corriente máxima, antes de pasar el umbral de fibrilación, que soporta el ser humano queda determinada por:

$$I_{ch} = \frac{0,116}{\sqrt{t_d}} \quad (7.2)$$

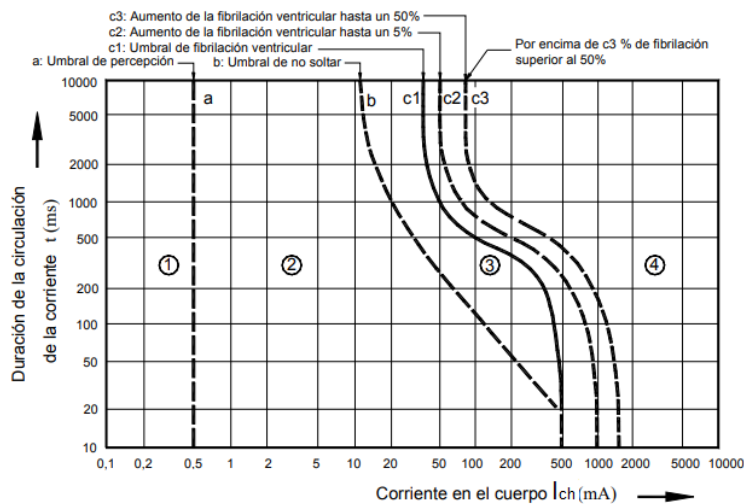


Figura 7.1 Efectos de la corriente en el cuerpo humano.

7.2 Tensiones de paso y contacto

Considerando los efectos de la corriente en el cuerpo humano, es necesario conocer a que diferencias de potencial puede verse afectada una persona dentro de la instalación de la subestación que generen riesgo para ella. Es decir, que provoquen una circulación de corriente a través del cuerpo que sobrepase el umbral de fibrilación. Si bien son varias las tensiones que se pueden presentar en la subestación (ver en [3]), entre ellas la tensión transferida, la de metal a metal, etc. las principales tensiones a tener en cuenta serán la tensión de paso y la tensión de contacto.

7.2.1 La resistencia del cuerpo humano R_{ch}

La trayectoria de la corriente generalmente se considera de una mano a los dos pies o de un pie a otro. La resistencia del cuerpo incluyendo la piel está en el rango de 500 a 3000 $[\Omega]$ para una corriente alterna de 50 o 60 [Hz]. Este valor de resistencia es variable debido a que es susceptible a diversos factores propios del ser humano que pueden afectarla, como la condición física, el estado de la piel, enfermedades, etc. La resistencia del cuerpo humano se reduce por el daño o punción de la piel en el punto de contacto, teniendo en cuenta esta condición, es que las normas en [7] y [3] establecen un valor de resistencia del cuerpo humano para el diseño de las medidas de protección de las siguientes magnitudes:

Para instalaciones de baja tensión:

$$R_{ch} = 2000 [\Omega] \quad (7.3)$$

Para instalaciones de media y alta tensión:

$$R_{ch} = 1000 [\Omega] \quad (7.4)$$

7.2.2 Resistencia a tierra de un pie R_p

Para efectos de análisis de circuitos, el pie humano es representado como un disco metálico y la resistencia de contacto de los zapatos, calcetines, etc., se ignora. Laurent indica que la resistencia a tierra en ohmios de un disco metálico de radio " f " (en metros) en la superficie de una tierra homogénea es:

$$R_p = \frac{\rho_1}{4 \cdot f} \quad (7.5)$$

Donde:

R_p : Resistencia de contacto entre un pie y el terreno

ρ_1 : Resistividad del primer estrato del suelo, es decir, el que está en contacto con el pie.

f : radio del disco que representa el pie humano. Usualmente se considera de 0,09 [m].

Se debe aplicar una capa de algún material de alta resistividad por la superficie de la tierra donde se encuentra enterrada la malla de puesta a tierra para aumentar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas que por ahí circulen. Dicha capa suele ser de grava y su alta resistividad permite que la corriente que pasa a través del cuerpo se reduzca considerablemente. La capa superficial también ayuda a retardar la evaporación de la humedad especialmente durante las temporadas de verano. Motivo de la existencia de esta capa es que se introduce el factor de disminución de la capa superficial C_s que es considerado un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. Este factor queda determinado por:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (7.6)$$

Donde:

ρ_s : Resistividad del material de la capa superficial [$\Omega \cdot m$].

ρ_1 : Resistividad del estrato que se encuentra debajo de la capa superficial [$\Omega \cdot m$].

h_s : Espesor de la capa superficial agregada [m]. Generalmente varía entre 0,10 y 0,15[m].

Considerando el factor de disminución de la capa superficial, la resistencia de un pie con el terreno se obtiene de:

$$R_p = \left[\frac{\rho_s}{4 \cdot f} \right] \cdot C_s \quad (7.7)$$

Y ya que el radio f del disco que representa el pie se considera de 0,09[m]:

$$R_p \approx 3\rho_s \cdot C_s \quad (7.8)$$

7.2.3 Tensión de paso

Corresponde a la tensión que se puede presentar entre ambos pies de una persona que se encuentre sobre la malla y cuya distancia entre pies es igual a 1 metro (distancia de un paso aproximadamente). Por lo tanto, la tensión de paso es equivalente a:

$$V_p = (2R_p + R_{ch}) \cdot I_{ch} \quad (7.9)$$

Para una persona de 50 [kg] y considerando que la resistencia del cuerpo humano es de 1000 [Ω], reemplazando las ecuaciones 7.2 y 7.8 en la 7.9, se tiene que la tensión de paso máxima permisible se determina por la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{116 + 0,696 \cdot C_s \cdot \rho_s}{\sqrt{t_d}} \quad (7.10)$$

El tiempo a la exposición de la corriente t_d quedará determinado por el tiempo de despeje de las protecciones eléctricas.

7.2.4 Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre un punto de una estructura o conductor metálico unido a la malla de puesta a tierra, en el cual una persona tiene en contacto una mano con dicha estructura, y el punto sobre la superficie del terreno en la cual se encuentra dicha persona. Para tal caso se considera que la persona se encuentra de pie y a una distancia de un metro de la estructura.

La tensión de contacto queda definida entonces por la siguiente expresión:

$$V_c = \left(R_{ch} + \frac{R_p}{2} \right) \cdot I_{ch} \quad (7.11)$$

Considerando la resistencia del cuerpo humano de 1000 [Ω], para una persona de 50 [kg] la tensión máxima permisible de contacto se determina por:

$$V_c = \frac{116 + 0,174 \cdot C_s \cdot \rho_s}{\sqrt{t_d}} \quad (7.12)$$

El tiempo a la exposición de la corriente t_d quedará determinado por el tiempo de despeje de las protecciones eléctricas.

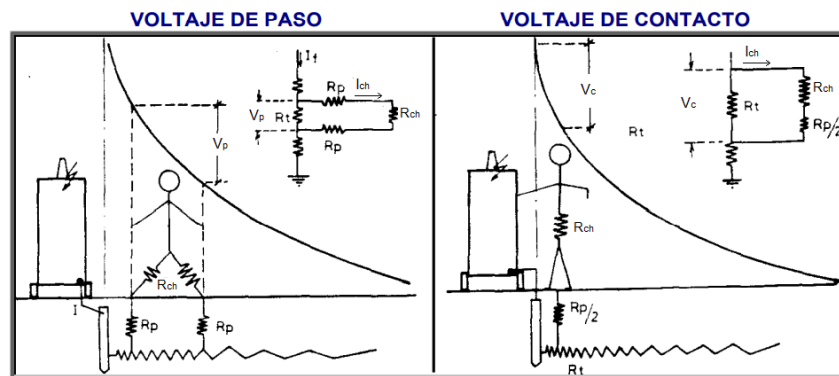


Figura 7.2 Tensión de paso y de contacto

8 CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA Y TIEMPO DE DESPEJE DE LAS PROTECCIONES

Para poder obtener la corriente máxima que circulará por la malla en caso de una falla es necesario tener un equivalente del sistema para así modelar un cortocircuito y poder calcular la magnitud de dicha corriente. De la misma manera es necesario el cálculo de la corriente de cortocircuito para poder obtener el tiempo que tardarán las protecciones eléctricas en despejar la falla. El circuito equivalente de secuencia es el que se utiliza para realizar los cálculos de la corriente que circulará por la malla y por ello la importancia de obtener las reactancias equivalentes de secuencia del sistema.

8.1 Reactancias de secuencia equivalentes del sistema

Para calcular las reactancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero, es necesario contar con la corriente de cortocircuito trifásica $i_{cc3\phi}$ y la corriente de cortocircuito monofásica $i_{cc1\phi}$ en el punto del empalme de media tensión de la subestación en la cual se desea diseñar la puesta a tierra de protección. Ambos valores de corrientes son solicitados a la empresa eléctrica encargada de la distribución, quienes usualmente generan un cobro por dichos datos.

8.1.1 Reactancia de cortocircuito de secuencia positiva y negativa.

Para determinar la reactancia de secuencia positiva y negativa se debe realizar un análisis de cálculo de cortocircuito trifásico en el punto del empalme. Es usual que las resistencias del sistema se consideren despreciables y por lo tanto el circuito equivalente de cortocircuito trifásico es el que se presenta en la figura 8.1.

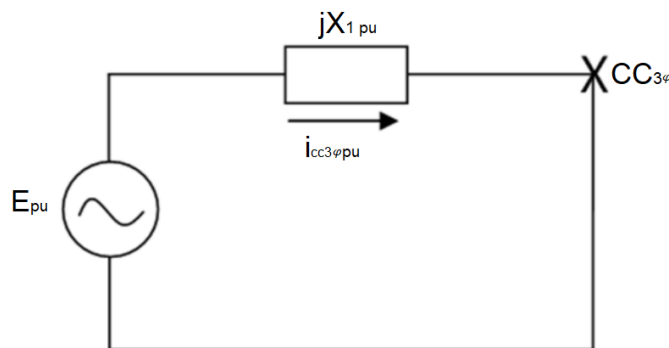


Figura 8.1 Circuito equivalente de cortocircuito trifásico en por unidad.

Asumiendo el cálculo en por unidad y observando el circuito de la figura 8.1, la reactancia de secuencia positiva en por unidad se obtiene de la siguiente expresión:

$$X_{1\ pu} = \frac{E_{pu}}{i_{cc3\phi\ pu}} \quad (8.1)$$

Donde:

E_{pu} : Tensión de pre-falla en por unidad. Usualmente es 1, ya que corresponde a la tensión nominal del empalme.

$X_{1\ pu}$: reactancia de secuencia positiva en por unidad.

$i_{cc3\phi\ pu}$: Corriente de cortocircuito trifásica en por unidad.

La reactancia de secuencia negativa $X_{2\ pu}$ se asume igual a la reactancia de secuencia positiva, por lo tanto:

$$X_{1\ pu} = X_{2\ pu} \quad (8.2)$$

8.1.2 Reactancia de cortocircuito de secuencia cero

Para determinar la reactancia de cortocircuito de secuencia cero se debe realizar un análisis de cálculo del cortocircuito monofásico en el punto del empalme de media tensión. La figura 8.2 muestra el circuito equivalente en componentes de secuencia en por unidad para este cortocircuito.

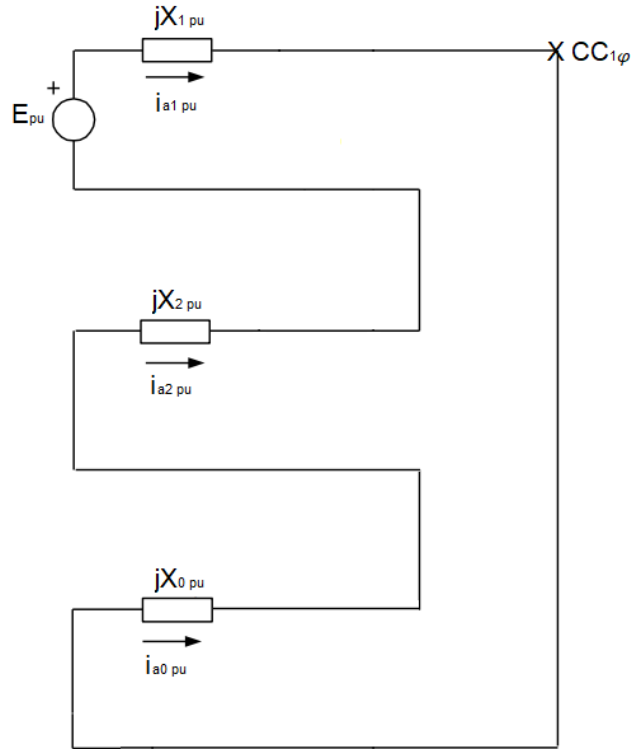


Figura 8.2 Circuito equivalente de secuencia cortocircuito monofásico.

Del circuito de la figura 8.2 se obtiene la expresión de la corriente de cortocircuito de secuencia cero en por unidad, la cual queda expresada de la siguiente manera:

$$i_{a0 \text{ pu}} = \frac{E_{pu}}{X_{1 \text{ pu}} + X_{2 \text{ pu}} + X_{0 \text{ pu}}} \quad (8.3)$$

Donde:

E_{pu} : Tensión de pre-falla en por unidad. Usualmente es 1, ya que corresponde a la tensión nominal del empalme.

$X_{1 \text{ pu}}$: Reactancia de secuencia positiva en por unidad.

$X_{2 \text{ pu}}$: Reactancia de secuencia negativa en por unidad.

$X_{0 \text{ pu}}$: Reactancia de secuencia cero en por unidad.

Dado que la corriente simétrica de cortocircuito monofásico corresponde a:

$$i_{cc1\phi \text{ pu}} = 3 \cdot i_{a0 \text{ pu}} \quad (8.4)$$

Reemplazando la ecuación 8.3 en 8.4, se tiene que:

$$i_{cc1\varphi pu} = \frac{3 \cdot E_{pu}}{X_{1pu} + X_{2pu} + X_{0pu}} \quad (8.5)$$

Despejando la reactancia de secuencia cero de la ecuación 8.5 y considerando la igualdad de la ecuación 8.2 se obtiene:

$$X_{0pu} = \frac{3 \cdot E_{pu}}{i_{cc1\varphi pu}} - 2 \cdot X_{1pu} \quad (8.6)$$

8.2 Corriente simétrica máxima de cortocircuito monofásico

Para la obtención de la corriente simétrica máxima de falla que circulará por la puesta a tierra de protección se analiza una falla de aislación entre una fase de la red de media tensión y la carcasa del transformador ubicado en la subestación, la cual al estar conectada a la malla derivará directamente a esta. Como se trata de un cortocircuito monofásico, la figura 8.3 muestra el circuito equivalente de secuencia en por unidad de la falla, en el cual se puede observar la presencia de la puesta a tierra de protección.

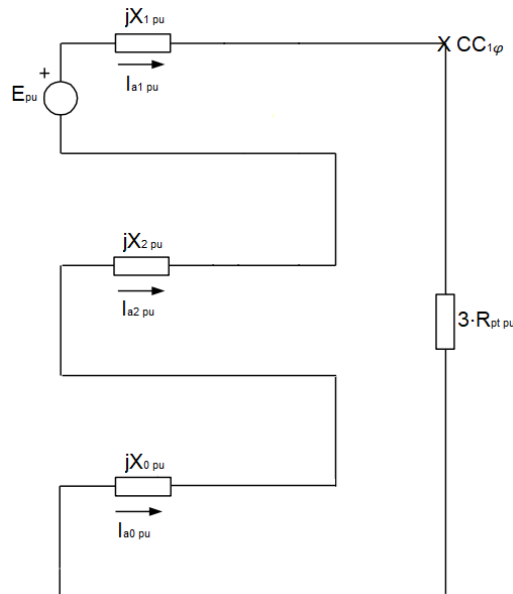


Figura 8.3 Circuito equivalente de secuencia cortocircuito monofásico.

Considerando lo de la ecuación 8.4 y el circuito de la figura 8.3, se tiene que la corriente máxima simétrica de cortocircuito monofásico, que circulará por la malla, en por unidad es:

$$I_{cc1\varphi pu} = \frac{3 \cdot E_{pu}}{j(X_{1pu} + X_{2pu} + X_{0pu}) + 3R_{ptpu}} \quad (8.7)$$

Donde:

R_{ptpu} : resistencia de la malla de puesta a tierra (correspondiente a la obtenida en la sección 6.4 o 6.5) en por unidad.

Entonces, la corriente máxima simétrica de cortocircuito monofásico que circulará hacia tierra a través de la malla, en Amperes, será:

$$I_{cc1\varphi} = I_{cc1\varphi pu} \cdot I_B \quad (8.8)$$

Donde:

I_B : Corriente base en [A]

8.3 Corriente rms máxima de cortocircuito monofásico durante la falla

Esta corriente corresponde al valor rms de la corriente de cortocircuito monofásico durante el tiempo que dura la falla; conceptualmente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_{F1\varphi} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} i_f^2 dt} \quad (8.9)$$

Donde:

$I_{F1\varphi}$: Corriente rms máxima de cortocircuito monofásico durante la falla [A].

t_d : tiempo de duración de la falla [s].

i_f : corriente de cortocircuito monofásico instantánea durante el tiempo que dura la falla [A].

i_f contiene una componente de corriente continua y otra componente alterna, ambas decaen en el tiempo; la asimetría de su forma de onda se debe a su componente de corriente continua.

Dicha corriente representada por la ecuación (8.9) se puede expresar como:

$$I_{F1\varphi} = D_f \cdot I_{cc1\varphi} \quad (8.10)$$

Donde:

D_f : factor de decremento.

$I_{cc1\varphi}$: corriente simétrica máxima de cortocircuito monofásico [A].

La tabla 8.1 presenta una serie de factores de decremento estimados para distintos tiempos de duración de falla. Esta tabla puede ser utilizada para calcular de manera rápida el factor de decremento del sistema que se esté analizando. La forma de utilizarla para obtener otros valores de D_f , para otros tiempos t_d , es interpolando linealmente el valor del tiempo de duración de la falla del caso en estudio, previamente calculado, entre los dos valores de tiempo más cercanos (superior e inferior) presentados en la tabla.

Tabla 8.1 Factor de decremento

Tiempo de falla t_d [s]	Factor de decremento D_f
0,01	1,7
0,02	1,62
0,04	1,5
0,08	1,32
0,1	1,25
0,25	1,1
0,5 o más	1

8.4 Tiempo de despeje de las protecciones

Para obtener el tiempo de despeje de las protecciones hay que analizar las curvas de operación de los fusibles de media tensión. La corriente a utilizar en el análisis de la curva corresponde a la corriente simétrica máxima de cortocircuito monofásico $I_{cc1\varphi}$ (obtenida por la ecuación 8.8) en Amperes. Interceptando esta corriente con la curva de operación del fusible se obtiene el tiempo de despeje t_d como se muestra en la figura 8.4 para un fusible tipo T.

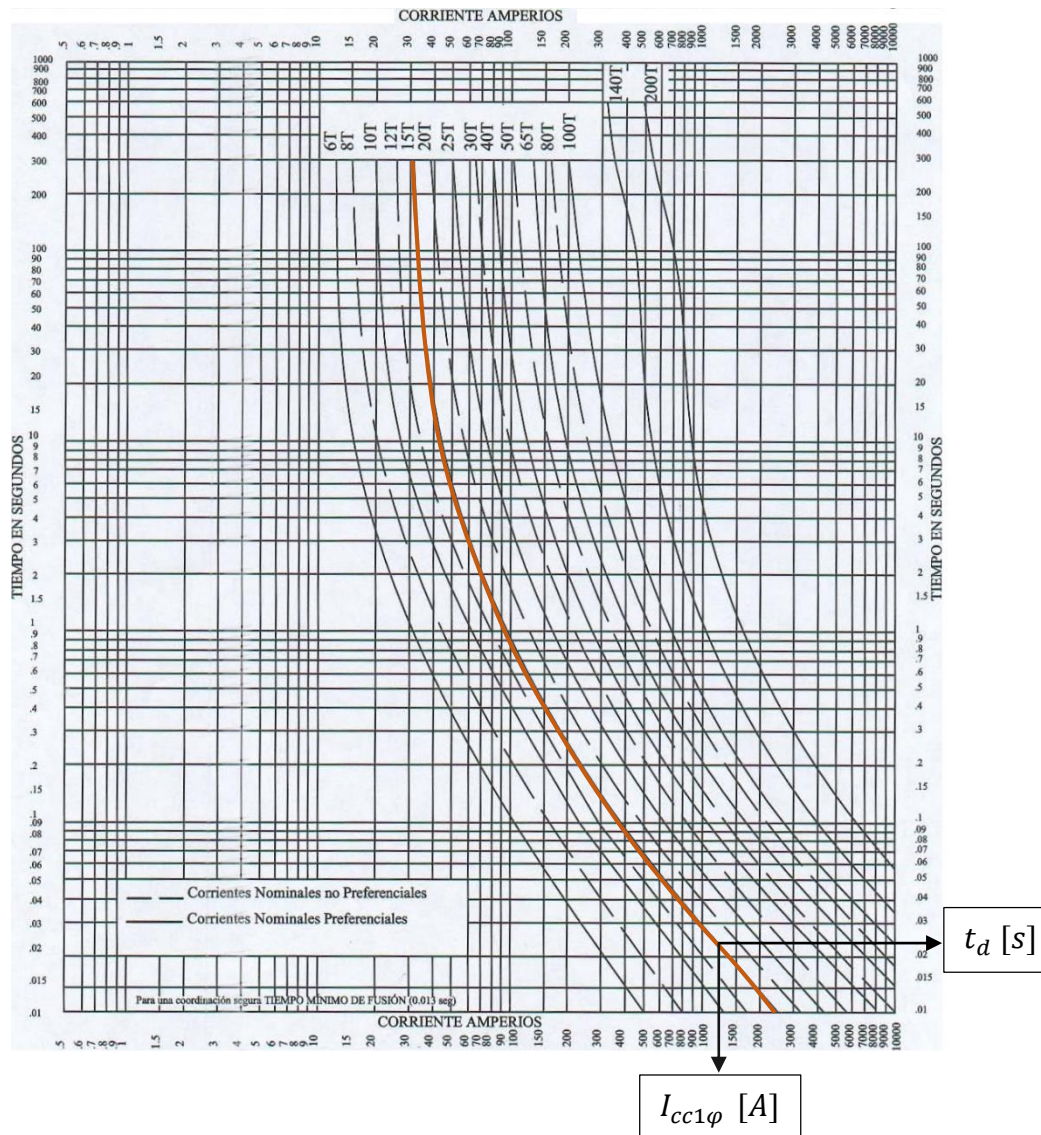


Figura 8.4 Curva de operación para fusibles tipo T.

9 CRITERIOS DE DISEÑO

9.1 Puesta a tierra de media tensión

Para cumplir con los objetivos de seguridad hacia las personas, para lo cual se diseña cualquier sistema de puesta a tierra de protección, es necesario lograr que las tensiones de paso y contacto, tanto en funcionamiento normal como en caso de una falla, se encuentren dentro de magnitudes seguras, ya sea en el interior como en el exterior inmediato de la zona delimitada por una subestación.

Considerando que la peor tensión de contacto en la subestación va a ser la tensión de la malla (excluyendo potenciales transferidos), será esta la que se ha de contemplar para el procedimiento del diseño.

La tensión de paso es considerada menos peligrosa que la tensión de contacto, es por ello que se suele utilizar la tensión de contacto como determinante en el diseño de una malla a tierra. Sin embargo, si se extiende una capa superficial de alta resistividad la cual no sobrepasa más allá del borde de la malla, la tensión de paso puede ser muy peligrosa. Independiente del caso en que se trabaje, una vez que ya se haya diseñado la puesta a tierra considerando el criterio de tensión de contacto, se debe comparar la tensión de paso con la tensión de paso admisible, corroborando que este criterio también se cumpla.

Dada la distribución de potencial presente en una malla de puesta a tierra, se determina que la peor tensión presente en la zona cubierta por la malla, es la tensión desde el centro de un retículo al electrodo que forma el mismo. A esta tensión se le denomina tensión de malla V_m , y corresponde a la peor tensión de contacto a la cual puede verse afectada una persona sobre la malla. En el caso de la peor tensión de paso, esta se presenta cuando se tiene un pie sobre el electrodo situado en el borde de la malla y el otro en el exterior. A esta tensión se le denomina voltaje de contorno o periferia V_{pp} .

Como lo explica IEEE Std 80-2000, mediante estudios realizados, las tensiones V_m y V_{pp} se pueden obtener mediante el uso de las siguientes expresiones:

$$V_m = \frac{\rho_{eq} \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_{F1\phi}}{L_M} \quad (9.1)$$

$$V_{pp} = \frac{\rho_{eq} \cdot K_{PP} \cdot K_i \cdot I_{F1\phi}}{L_{PP}} \quad (9.2)$$

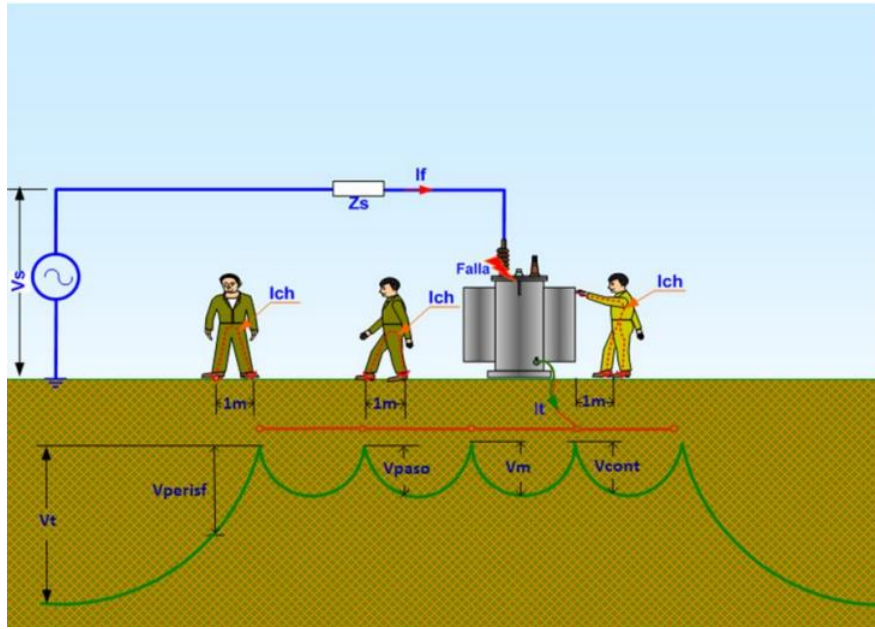


Figura 9.1 Tensión de malla y de periferia para una malla de puesta a tierra.

Los factores presentes en las expresiones 9.1 y 9.2 se definen a continuación:

- $I_{F1\phi}$: Corriente rms máxima de cortocircuito monofásico durante la falla [A].
- **Factor geométrico K_m :**

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left(\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right] \right) \quad (9.3)$$

Para mallas sin barras o mallas con sólo unas pocas varillas de tierra, o ninguna ubicada en las esquinas o en el perímetro:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (9.4)$$

Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro o varillas de tierra en las esquinas de la malla $K_{ii} = 1$.

n corresponde al número efectivo de conductores paralelos en una malla dada. Para calcular dicho número, en una malla rectangular o de forma irregular donde n es distinto en ambas aristas, se puede calcular su equivalente mediante la siguiente expresión:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (9.5)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (9.6)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{S}}} \quad (9.7)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{S} \right]^{\frac{0,7 \cdot S}{L_x \cdot L_y}} \quad (9.8)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (9.9)$$

L_c : longitud total del conductor en la malla horizontal [m]

L_p : longitud perimetral de la malla [m]

S : superficie que cubre la malla [m²] ($S = L_x \cdot L_y$)

L_x : longitud máxima de la malla en la dirección x [m]

L_y : longitud máxima de la malla en la dirección y [m]

D_m : distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla [m]

D : distancia de separación entre dos electrodos paralelos de la malla que forman una retícula [m]

d : diámetro del conductor de la malla [m]

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (9.10)$$

$h_o = 1$ [m], profundidad de referencia de los conductores enterrados

h : profundidad a la que se entierra la malla [m]

- **Factor de irregularidad o corrección K_i :**

Teniendo en consideración el n definido anteriormente:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (9.11)$$

- **Longitud efectiva del conductor enterrado L_M**

Si la malla no tiene varillas de tierra, o sólo tiene algunas varillas dispersas en la red, pero ninguna situada en las esquinas o en el perímetro de la malla, L_M es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (9.12)$$

Donde:

L_R : longitud total (suma) de todas las barras presentes en la malla [m]

Si la malla posee barras ubicadas en las esquinas o en la periferia o en toda la red, L_M se determina por:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (9.13)$$

Donde:

L_r : longitud de cada barra [m].

- **Longitud efectiva del conductor enterrado L_{PP}**

Independiente si la malla tiene o no barras, la longitud L_{PP} , se determina por la siguiente expresión:

$$L_{PP} = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (9.14)$$

- **Factor geométrico K_{PP}**

$$K_{PP} = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (9.15)$$

Por lo tanto, las condiciones que deben cumplirse en el diseño de puesta a tierra para asegurarse que las tensiones a las que se pueda ver enfrentada una persona en caso de una falla sean inferiores a las tensiones máximas soportadas por el ser humano son:

$$V_m \leq V_c \quad (9.16)$$

$$V_{pp} \leq V_p \quad (9.17)$$

9.2 Dimensionamiento del conductor enterrado MT y BT.

La dimensión del conductor enterrado puede ser determinada teniendo en consideración la corriente que circula por la malla y la temperatura máxima permisible o admisible en los puntos de las uniones, ya que estos son los puntos más débiles de la malla. La temperatura permisible será entonces función del tipo de unión que se emplee. En el caso de **uniones apernadas** la temperatura admisible es de 250 °C y para soldadura por **fusión exotérmica** la temperatura máxima permisible se encuentra sobre los 900 °C.

Una vez determinada la temperatura máxima permisible, se utiliza la ecuación de Onderdonk para determinar la sección mínima del conductor:

$$S_{min} = \frac{I_{F1\phi}}{1974 \cdot \sqrt{\frac{\log_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 \cdot t_d}}} \quad (9.18)$$

Donde:

S_{min} : sección mínima del conductor [mm²]

$I_{F1\phi}$: corriente rms máxima de cortocircuito monofásico durante la falla [A]

T_m : temperatura máxima admisible [°C]

T_a : temperatura ambiente [°C]

t_d : tiempo durante el cual circula la corriente en la malla [s]

También es necesario considerar la resistencia mecánica a la cual pueda verse afectado el electrodo de puesta a tierra. Y es por ello que la norma establece para un conductor de cobre que **la sección mínima** debe ser de 21 [mm²]. Dimensión que ha de utilizarse en la puesta a tierra en caso que la sección mínima calculada por la expresión de Onderdonk sea inferior.

9.3 Procedimiento de diseño

- **Paso 1:** Determinar el área donde va a ser instalada la puesta a tierra y realizar un estudio del terreno para obtener la cantidad de estratos presentes, la resistividad y espesor de cada uno, desarrollando el procedimiento explicado en los capítulos 3 y 4.
- **Paso 2:** Realizar un diseño preliminar de la puesta a tierra a diseñar con las dimensiones que esta tendrá (largo, ancho, reticulado, profundidad, sección del electrodo, etc.). En el caso de la puesta a tierra de media tensión esta tendrá que ser siempre una malla con o sin barras verticales.
- **Paso 3:** Determinar la resistividad equivalente del terreno como se indica en el capítulo 5.

- **Paso 4:** Verificar que la sección escogida para el conductor sea mayor que la sección mínima determinada por la ecuación de Onderdonk 9.18 y mayor que los 21 [mm²] establecido por norma.
- **Paso 5:** Calcular la resistencia de puesta a tierra. Dependiendo del diseño escogido se calcula con las expresiones del capítulo 6.
- **Paso 6:** Verificar que la resistencia de puesta a tierra sea menor a la indicada por la norma, es decir, menor que 20 [Ω] para puesta a tierra de MT y BT. Si se trata de una puesta a tierra de protección y cumple con la condición se pasa al paso 7. Si se trata de una puesta a tierra de servicio la resistencia de esta una vez incorporada al neutro debe ser menor a 5 [Ω], si cumple esta condición está lista para ser implementada asegurándose del cumplimiento de las otras condiciones explicadas en la sección 2.3 referidas a la distancia entre puestas a tierras. Si las puestas a tierra no cumplen con la condición de resistividad habrá que volver al paso 2 y rediseñar la puesta a tierra.
- **Paso 7:** Calcular las tensiones de paso y de contacto máximas tolerables por las personas. Estas se determinan por las ecuaciones 7.10 y 7.12.
- **Paso 8:** Calcular las tensiones de malla y periferia presentes en la puesta a tierra dadas por las ecuaciones 9.1 y 9.2.
- **Paso 9:** Si las tensiones de malla y periferia son inferiores a las tensiones de paso y contacto tolerables, el diseño está correcto. Si no se deberá volver a ver el diseño preliminar del paso 2 y realizar modificaciones para que la malla de puesta a tierra cumpla con las condiciones 9.16 y 9.17. Dichas modificaciones pueden ser la distancia entre los conductores, añadir electrodos, la sección del electrodo, etc.

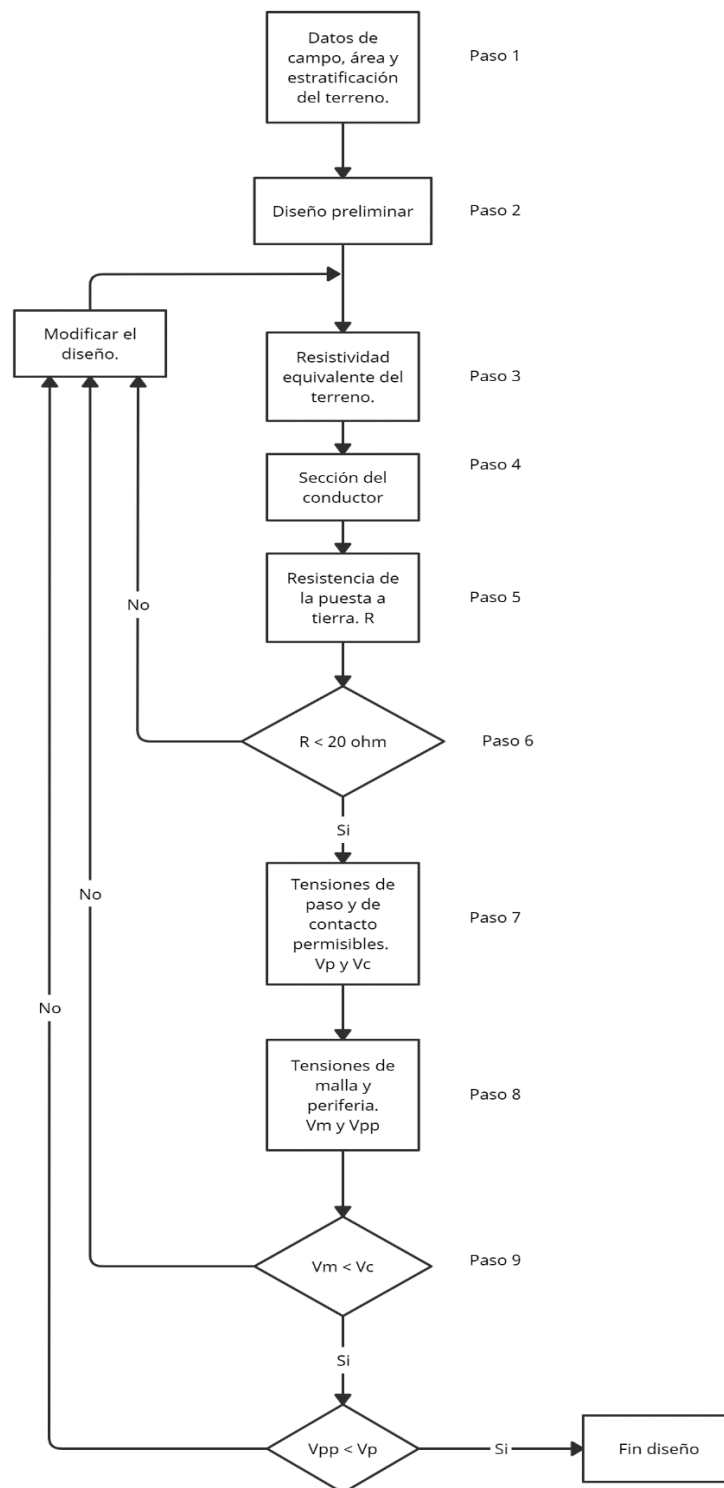


Figura 9.2 Diagrama de bloques, procedimiento de diseño tierra de protección.

10 CONSTRUCCIÓN DE LA PUESTA A TIERRA

Una vez obtenido el diseño correcto de puesta a tierra, que cumpla con todas las exigencias establecidas, se puede pasar a la etapa de construcción. En esta etapa se consideran otro tipo de factores como la ejecución de las uniones de electrodos, los tipos de conductores, entre otros que escapan del alcance de este trabajo. Sin embargo, se desarrollan algunos puntos de interés. Mayor información respecto a la construcción se puede encontrar en los apuntes especificados en la bibliografía [2], [3] y [5].

10.1 Camarillas de inspección

Es necesario instalar camarillas que permitan tener un acceso a la puesta a tierra para así poder realizar la medición de resistencia de puesta a tierra y futuras inspecciones de mantención para asegurar el correcto estado y funcionamiento de la misma. Se ubican de preferencia en los puntos de unión y en las mallas se deben instalar en sus vértices extremos.

10.2 Medición de resistencia de puesta a tierra

Una vez que se haya construido la puesta a tierra hay que realizar la correspondiente medida de la resistencia de esta para corroborar que cumple con lo estipulado en el diseño y asegurarse que esté dentro de los límites aceptables.

Se utiliza el principio de la caída de potencial para determinar la resistencia de la puesta a tierra. Se hace circular una corriente constante, mediante una fuente independiente de potencia, entre la puesta a tierra y un electrodo auxiliar de corriente. La relación entre la diferencia de potencial, presente entre la puesta a tierra y la tierra remota (otro electrodo), y la corriente que está circulando, determina la resistencia de la puesta a tierra.

Para llevar a cabo la medición se puede hacer uso del geóhmetro, el cual indica de manera inmediata el valor de la resistencia obtenida por el cociente entre la diferencia de potencial y la corriente inyectada.

El procedimiento consiste en fijar un electrodo que inyectará corriente al suelo a una distancia, para el caso de las mallas, de aproximadamente cinco veces su diagonal mayor, y para el caso de una barra vertical, a una distancia diez veces la longitud de la barra. Un electrodo de potencial se fijará a la puesta a tierra y luego otro electrodo conectado al otro terminal de potencial del geóhmetro se ira

desplazando desde la posición de la puesta a tierra hasta el electrodo inyector de corriente. A cada desplazamiento del electrodo se debe ir registrando la resistencia entregada por el instrumento y la distancia desde la puesta a tierra al electrodo que se desplaza.

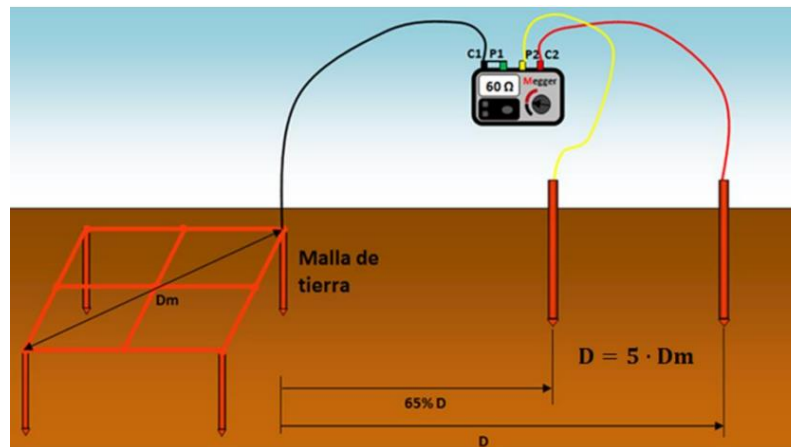


Figura 10.1 Medición de resistencia para una malla de puesta a tierra.

Se genera una curva de resistencia versus distancia que debe presentar una forma similar a la de la figura 10.2. El valor presente en la parte plana de la curva corresponde a la resistencia de la puesta a tierra.

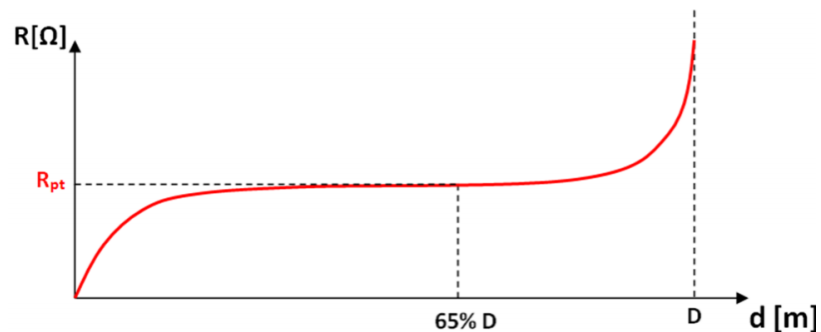


Figura 10.2 Curva de la resistencia de puesta a tierra.

A aproximadamente el 65% de la distancia entre la puesta a tierra y el electrodo inyector de corriente se encuentra la resistencia de la puesta a tierra.

10.3 Tratamientos químicos de los suelos

La utilización de aditivos químicos en ocasiones se hace necesaria debido a la alta resistividad que presentan algunos terrenos o características que dificultan el buen funcionamiento de la puesta a tierra. Es por ello que con estos productos se buscan conseguir algunos de los siguientes objetivos:

- Reducir la resistencia de puesta a tierra mejorando la conductividad del terreno circundante.
- Relleno entre el electrodo y terrenos duros trabajados especialmente para poder instalar los electrodos.
- Inhibir o retardar la corrosión de los electrodos.

Algunos de los productos que se utilizan para conseguir estos objetivos son sales químicas como el sulfato de cobre y el sulfato de sodio, derivados del carbono, arcillas, barras químicas, entre otros.



Figura 10.3 Aditivo para puestas a tierra.

11 DESARROLLO DEL DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN

11.1 Diseño de puesta a tierra de media tensión (tierra de protección)

Se requiere construir una puesta a tierra de protección para una subestación aérea de 300 [KVA] de relación 13,2/0,38 [KV].

Para el estudio del terreno se realizan las medidas de resistividad utilizando la configuración Schlumberger. Con los datos obtenidos y aplicando la fórmula 3.5 para la obtención de la resistividad aparente se completa la siguiente tabla:

Tabla 11.1 Medidas de terreno, configuración Schlumberger.

Tabla de terreno						
N	L [m]	a [m]	R [Ω]	n	n+1	ρ [Ω m]
1	1,5	1	11,515	1,0	2,0	72,349
2	2,0	1	6,718	1,5	2,5	79,142
3	2,5	1	4,048	2,0	3,0	76,301
4	3,5	1	1,749	3,0	4,0	65,934
5	4,5	1	1,051	4,0	5,0	66,034
6	5,5	1	0,752	5,0	6,0	70,872
7	10,5	1	0,259	10,0	11,0	89,501
8	15,5	1	0,126	15,0	16,0	94,999
9	20,5	1	0,076	20,0	21,0	100,277

Con los datos de la distancia de separación L y la resistencia aparente ρ para cada medida, se realiza la gráfica logarítmica de la curva de terreno.

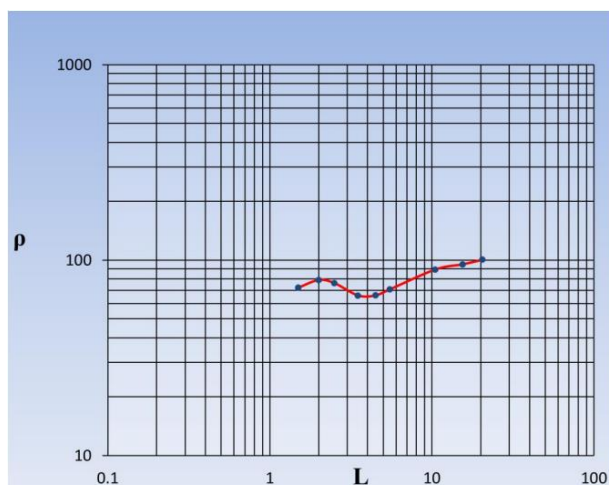


Figura 11.1 Curva de terreno.

Para determinar la estratificación del terreno se aplica la comparación de la curva de terreno de la figura 11.1 con la de la curva patrón. Observando la curva de terreno se puede determinar que la familia de curvas patrón a la que más se asemeja es a la de tres estratos H-6. La comparación de las curvas se observa en la figura 11.2.

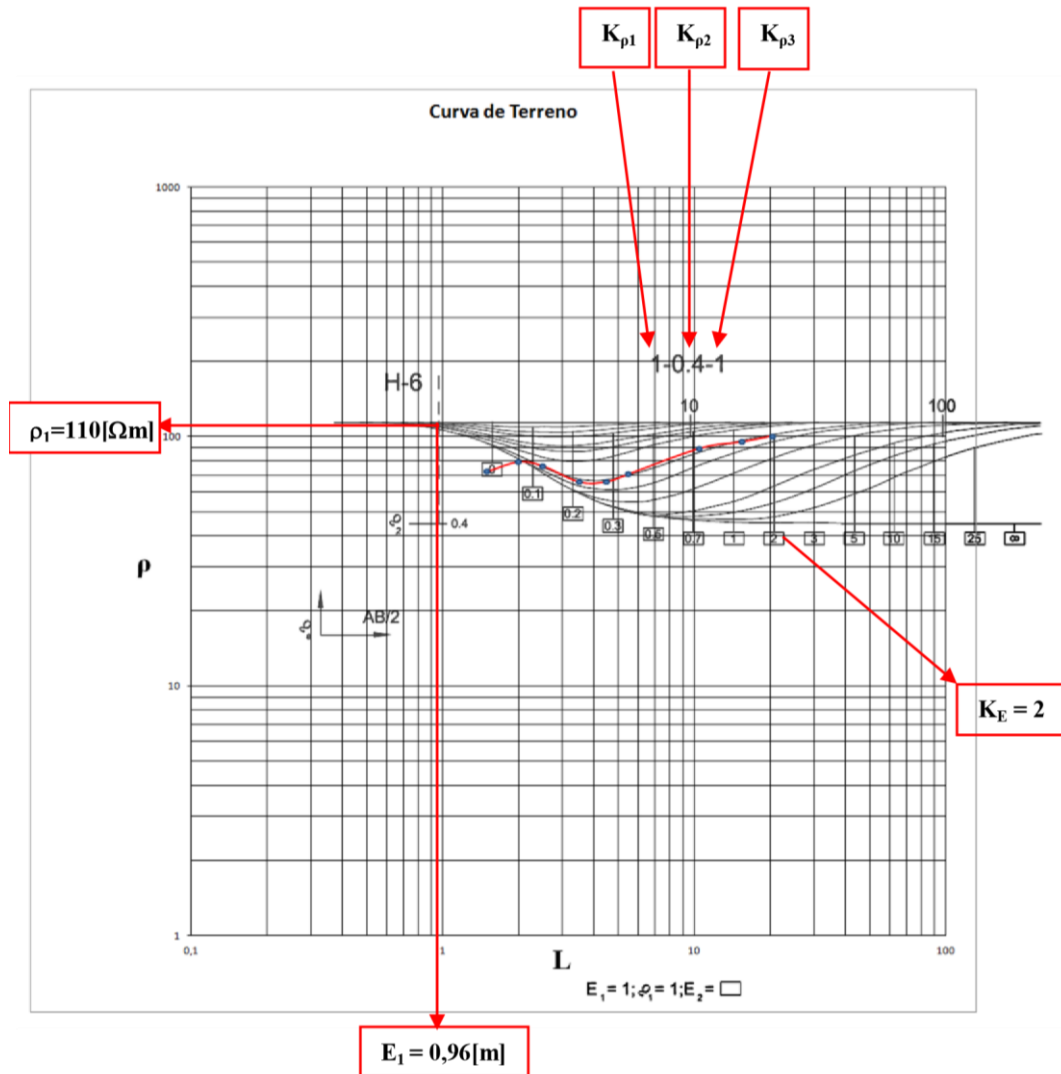


Figura 11.2 Comparación de la curva de terreno con la curva patrón.

De la comparación de curvas de la figura 11.2 se identifican las siguientes variables:

- Resistividad y espesor del primer estrato: $\rho_1 = 110 [\Omega \cdot m]$ $E_1 = 0,96 [m]$.
- Factores de resistividad: $K_{\rho 1} = 1$, $K_{\rho 2} = 0,4$ y $K_{\rho 3} = 1$
- Factores de espesor: $K_{E2} = 2$

Por lo tanto, la estratificación del terreno tiene las siguientes características:

Tabla 11.2 Estratificación del terreno.

$\rho [\Omega \cdot m]$	$E [m]$	$h [m]$
$\rho_1 = 110 [\Omega \cdot m]$	$E_1 = 0,96 [m]$	$h_1 = 0,96 [m]$
$\rho_2 = \rho_1 \cdot K_{\rho 2} = 44 [\Omega \cdot m]$	$E_2 = E_1 \cdot K_{E2} = 1,92 [m]$	$h_2 = 2,88 [m]$
$\rho_3 = \rho_1 \cdot K_{\rho 3} = 110 [\Omega \cdot m]$	$E_3 = \infty [m]$	$h_3 = \infty [m]$

- **Diseño preliminar**

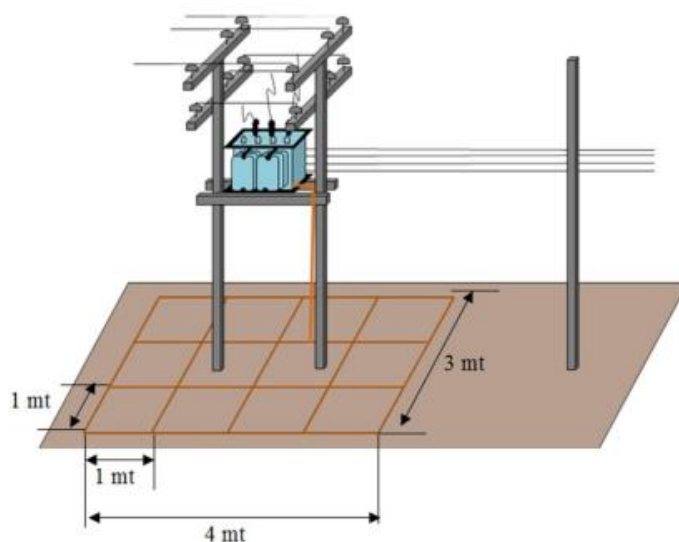


Figura 11.3 Diseño preliminar malla de puesta a tierra de protección.

El diseño preliminar será una malla de puesta a tierra rectangular. Que abarcará toda la superficie de la subestación y un metro y medio más allá de los postes. Teniendo en consideración el área de la subestación, las dimensiones escogidas para la malla son la siguientes:

$L_c = 31 [m]$: Longitud total del conductor enterrado.

$L_p = 14 [m]$: Longitud perimetral de la malla a tierra.

$A = 4 [m]$: Longitud mayor de la malla.

$B = 3 [m]$: Longitud menor de la malla.

$L_x = A$: Longitud máxima de la malla en la dirección x.

$L_y = B$: Longitud máxima de la malla en la dirección y.

$S = 12 [m^2]$: Superficie abarcada por la malla a tierra.

$D_m = 5 [m]$: Distancia máxima entre dos puntos de la malla.

$h = 0,7 [m]$: Profundidad de enterramiento de la malla.

$Secc = 33,6 [mm^2]$: Sección del conductor que conformará la malla.

$d = 0,00654 [m]$: Diámetro del conductor que conformará la malla.

$D = 1 [m]$: Distancia entre dos conductores paralelos.

$L_r = 0 [m]$: Longitud de las barras enterradas.

$N_r = 0$: Número de barras verticales enterradas.

$L_R = 0 [m]$: Longitud total de las barras.

- **Resistividad equivalente**

La resistividad equivalente del terreno se calcula mediante el método de Burgsdorf – Yakobs desarrollado en la sección 5.1. Dicho cálculo se expresa a continuación:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1,954 \quad (11.1)$$

$$b = h + L = 0,7 \quad (11.2)$$

$$r_0 = \sqrt{r^2 - b^2} = 1,825 \quad (11.3)$$

$$q_0 = \sqrt{2r(r + b)} = 3,221 \quad (11.4)$$

$$u_1 = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_1^2} = 3,825 \quad (11.5)$$

$$u_2 = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_2^2} = 4,69 \quad (11.6)$$

$$u_3 = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_3^2} = \infty \quad (11.7)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{2}(u_1^2 - \sqrt{u_1^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} = 1,721 \quad (11.8)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{2}(u_2^2 - \sqrt{u_2^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} = 1,305 \quad (11.9)$$

$$v_3 = \sqrt{\frac{1}{2}(u_3^2 - \sqrt{u_3^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} = 0 \quad (11.10)$$

$$F_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{r_0}\right)^2} = 0,333 \quad (11.11)$$

$$F_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{v_2}{r_0}\right)^2} = 0,699 \quad (11.12)$$

$$F_3 = \sqrt{1 - \left(\frac{v_3}{r_0}\right)^2} = 1 \quad (11.13)$$

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{(F_i - F_{i-1})}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{F_1}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3}} = 70,969 [\Omega \cdot m] \quad (11.14)$$

- **Cálculo de la resistencia de puesta a tierra por el método de Schwarz**

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3 \cdot h}{\sqrt{S}} - \left[0,044 \cdot \left(\frac{A}{B}\right)\right] = 0,907 \quad (11.15)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8 \cdot h}{\sqrt{S}} + \left[\left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}}\right) \cdot \left(\frac{A}{B}\right)\right] = 3,814 \quad (11.16)$$

$$R = \frac{\rho_{eq}}{\pi \cdot L} \left[\ln\left(\frac{2L}{\sqrt{h \cdot d}}\right) + \frac{K_1 \cdot L}{\sqrt{S}} - K_2 \right] = 8,103 [\Omega] \quad (11.17)$$

Se verifica que la puesta a tierra diseñada cumple con el valor de resistencia determinado por la norma al ser este menor que 20 $[\Omega]$

- **Reactancias equivalentes del circuito eléctrico**

Para la obtención de las reactancias es necesario contar con las corrientes de cortocircuito monofásico y trifásico en el punto del empalme de media tensión. Estas corrientes se le solicitan a la empresa distribuidora, para este problema se supondrá una corriente de cortocircuito monofásico $i_{cc1\phi}$ de 1200 [A] y una de cortocircuito trifásico $i_{cc3\phi}$ de 3900 [A].

Tomando como base una potencia de 100 [MVA] y una tensión de 13,2 [KV]. Se tiene que las corrientes de cortocircuito en por unidad son:

$$i_{cc1\phi pu} = 0,274 \quad (11.18)$$

$$i_{cc3\phi pu} = 0,892 \quad (11.19)$$

Teniendo en consideración las corrientes de cortocircuito y las ecuaciones 8.1 y 8.6, las reactancias de secuencia equivalentes del sistema son:

$$X_{1pu} = X_{2pu} = \frac{1}{i_{cc3\phi pu}} = \frac{1}{0,892} = 1,122 \quad (11.20)$$

$$X_{0pu} = \frac{3}{i_{cc1\phi pu}} - 2 \cdot X_{1pu} = 8,899 \quad (11.21)$$

Con las reactancias equivalentes del sistema y la resistencia de la puesta a tierra del diseño preliminar obtenida por el método de Schwarz en la ecuación 11.17, es posible calcular la corriente simétrica máxima de cortocircuito monofásico. Esta corriente se obtiene por la siguiente expresión:

$$I_{cc1\phi pu} = \frac{3 \cdot E_{pu}}{j(X_{1pu} + X_{2pu} + X_{0pu}) + 3R_{pt pu}} \quad (11.22)$$

Reemplazando los datos se tiene que:

$$I_{cc1\phi pu} = 0,168 \quad (11.23)$$

En amperes:

$$I_{cc1\varphi} = 734,922 \text{ [A]} \quad (11.24)$$

Con la corriente $I_{cc1\varphi}$ es posible obtener el tiempo de despeje de las protecciones. La subestación cuenta con un fusible tipo T – 15. La intersección de la corriente con la curva de operación del fusible se muestra en la figura 11.4. El tiempo de despeje de las protecciones es, por lo tanto:

$$t_d = 0,04 \text{ [s]} \quad (11.25)$$

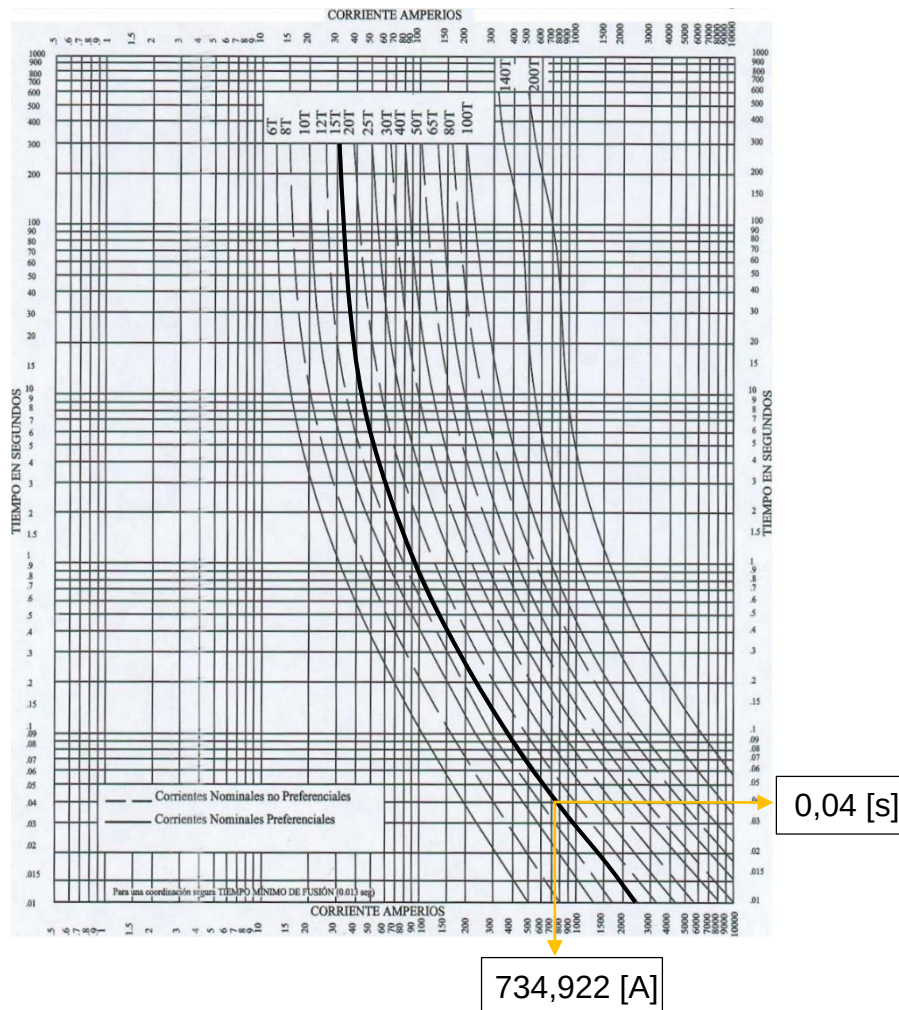


Figura 11.4 Tiempo de despeje de protecciones. (Fusible tipo T).

Para calcular la corriente rms máxima de cortocircuito monofásico que circulará por la malla hay que obtener primero el factor de decremento. Haciendo uso de la tabla 8.1 se determina que el factor de decremento es de 1,5. Fortuitamente el tiempo de duración de la falla corresponde a uno presente en la tabla, sin embargo, recordar que en el caso de que esto no suceda es posible realizar la interpolación lineal y así obtener el factor de decremento.

$$D_f = 1,5 \quad (11.26)$$

Por lo tanto, la corriente rms máxima de cortocircuito monofásico durante la falla que circulará por la malla de puesta a tierra en amperes es:

$$I_{F1\phi} = D_f \cdot I_{cc1\phi} \quad (11.27)$$

$$I_{F1\phi} = 1102,383 [A] \quad (11.28)$$

- **Sección mínima del conductor:**

Verificación de sección del conductor enterrado considerando una soldadura por fusión exotérmica ($T_m = 900^\circ C$) y temperatura ambiente (T_a) de $40^\circ C$.

$$S_{min} = \frac{I_{F1\phi}}{1974 \cdot \sqrt{\frac{\log_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 \cdot t_d}}} = 0,817 [mm^2] \quad (11.48)$$

Dado que el conductor que se está utilizando para el diseño de la malla tiene una sección de $33,6 [mm^2]$ este cumple con la sección mínima por temperatura de unión y también cumple con la sección mínima establecida por la norma de $21 [mm^2]$.

- **Cálculo de la tensión de paso y contacto máxima permisibles para el ser humano**

Se considerará una capa superficial de gravilla que tendrá un espesor de 0,15 [m]. Por lo tanto:

$t_d = 0,04$ [s]: Tiempo de despeje de las protecciones.

$\rho_s = 2500$ [$\Omega \cdot m$]: Resistencia de la capa superficial de grava.

$h_s = 0,15$ [m]: Espesor de la capa superficial

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} = 0,779 \quad (11.29)$$

$$V_c = \frac{116 + 0,174 \cdot C_s \cdot \rho_s}{\sqrt{t_d}} = 2275,162 \text{ [V]} \quad (11.30)$$

$$V_p = \frac{116 + 0,696 \cdot C_s \cdot \rho_s}{\sqrt{t_d}} = 7360,646 \text{ [V]} \quad (11.31)$$

- **Calculo de la tensión de malla y periferia**

Debido a que la malla es rectangular el valor de “n” que representa el número de conductores paralelos es distinto a lo largo y ancho, se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} = 4,429 \quad (11.32)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{S}}} = 1,005 \quad (11.33)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{S} \right]^{\frac{0,7 \cdot S}{L_x \cdot L_y}} = 1 \quad (11.34)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} = 1 \quad (11.35)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 4,451 \quad (11.36)$$

Para mallas sin barras el factor K_{ii} y el factor K_h se determina por la siguiente expresión

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} = 0,374 \quad (11.37)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1,304 \quad (11.38)$$

$h_o = 1[m]$: valor de referencia de los conductores enterrados.

El factor K_m es por lo tanto:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left(\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right] \right) = 0,676 \quad (11.39)$$

Factor K_i

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 1,303 \quad (11.40)$$

Dado que la malla no cuenta con barras las longitudes efectivas del conductor enterrado se expresan como:

$$L_M = L_C + L_R = 31 \quad (11.41)$$

$$L_{PP} = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R = 23,25 \quad (11.42)$$

Factor K_{PP} :

$$K_{PP} = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] = 0,675 \quad (11.43)$$

Las tensiones de malla y periferia son:

$$V_m = \frac{\rho_{eq} \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_{F1\phi}}{L_M} = 2223,616 [V] \quad (11.44)$$

$$V_{pp} = \frac{\rho_{eq} \cdot K_{PP} \cdot K_i \cdot I_{F1\phi}}{L_{PP}} = 2957,893 [V] \quad (11.45)$$

- **Verificación de las condiciones de seguridad establecidas para una malla de puesta a tierra:**

$$V_m \leq V_C$$

$$2223,616 [V] < 2275,162 [V] \quad (11.46)$$

$$V_{pp} \leq V_p$$

$$2957,893 [V] < 7360,646 [V] \quad (11.47)$$

11.2 Diseño de puesta a tierra para baja tensión (tierra de servicio)

Para la misma subestación del caso 11.1 se desea diseñar una puesta a tierra de servicio la cual se conectará al conductor neutro de la red eléctrica de baja tensión en el poste contiguo a la subestación.

Las características del terreno son las mismas, por lo tanto, la estratificación del suelo se mantiene como lo indica la siguiente tabla:

Tabla 11.3 Estratificación del terreno

ρ [$\Omega \cdot m$]	E [m]	h [m]
$\rho_1 = 110$ [$\Omega \cdot m$]	$E_1 = 0,96$ [m]	$h_1 = 0,96$ [m]
$\rho_2 = 44$ [$\Omega \cdot m$]	$E_2 = 1,92$ [m]	$h_2 = 2,88$ [m]
$\rho_3 = 110$ [$\Omega \cdot m$]	$E_3 = \infty$ [m]	$h_3 = \infty$ [m]

- **Diseño preliminar**

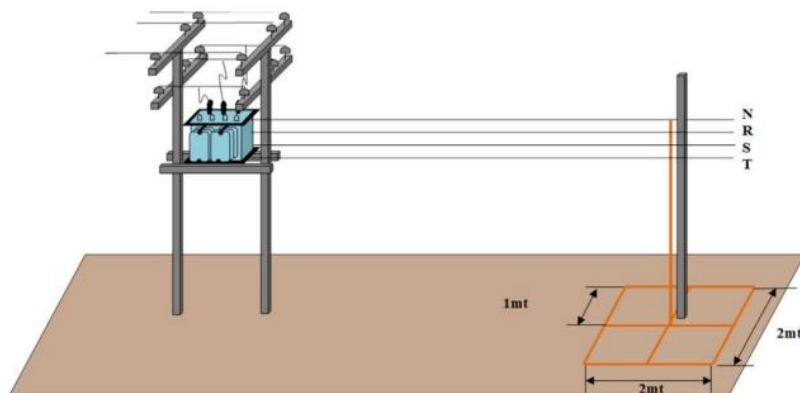


Figura 11.5 Diseño preliminar malla de puesta a tierra de servicio.

El diseño preliminar corresponde a una malla de puesta a tierra cuadrada, la cual posee las siguientes dimensiones:

$L_c = 12 \text{ [m]}$: Longitud total del conductor enterrado.

$L_p = 8 \text{ [m]}$: Longitud perimetral de la malla a tierra.

$A = 2 \text{ [m]}$: Longitud mayor de la malla.

$B = 2 \text{ [m]}$: Longitud menor de la malla.

$L_x = A$: Longitud máxima de la malla en la dirección x.

$L_y = B$: Longitud máxima de la malla en la dirección y.

$S = 4 \text{ [m}^2\text{]}$: Superficie abarcada por la malla a tierra.

$D_m = 2,828 \text{ [m]}$: Distancia máxima entre dos puntos de la malla.

$h = 0,7 \text{ [m]}$: Profundidad de enterramiento de la malla.

$Secc = 33,6 \text{ [mm}^2\text{]}$: Sección del conductor que conformará la malla.

$d = 0,00654 \text{ [m]}$: Diámetro del conductor que conformará la malla.

$D = 1 \text{ [m]}$: Distancia entre dos conductores paralelos.

$L_r = 0 \text{ [m]}$: Longitud de las barras enterradas.

$N_r = 0$: Número de barras verticales enterradas.

$L_R = 0 \text{ [m]}$: Longitud total de las barras.

- **Cálculo de la resistividad equivalente del terreno:**

Utilizando el método de Burgsdorf - Yakobs se obtiene:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1,128 \quad (11.49)$$

$$b = h + L = 0,7 \quad (11.50)$$

$$r_0 = \sqrt{r^2 - b^2} = 0,885 \quad (11.51)$$

$$q_0 = \sqrt{2r(r + b)} = 2,031 \quad (11.52)$$

$$u_1 = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_1^2} = 2,415 \quad (11.53)$$

$$u_2 = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_2^2} = 3,634 \quad (11.54)$$

$$u_3 = \sqrt{q_0^2 + r_0^2 + h_3^2} = \infty \quad (11.55)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{2}(u_1^2 - \sqrt{u_1^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} = 0,788 \quad (11.56)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{2}(u_2^2 - \sqrt{u_2^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} = 0,499 \quad (11.57)$$

$$v_3 = \sqrt{\frac{1}{2}(u_3^2 - \sqrt{u_3^4 - 4q_0^2 \cdot r_0^2})} = 0 \quad (11.58)$$

$$F_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{v_1}{r_0}\right)^2} = 0,456 \quad (11.59)$$

$$F_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{v_2}{r_0}\right)^2} = 0,826 \quad (11.60)$$

$$F_3 = \sqrt{1 - \left(\frac{v_3}{r_0}\right)^2} = 1 \quad (11.61)$$

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{(F_i - F_{i-1})}{\rho_i}} = \frac{1}{\frac{F_1}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3}} = 70,788 [\Omega \cdot m] \quad (11.62)$$

- **Resistencia de puesta a tierra por el método de Schwarz:**

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3 \cdot h}{\sqrt{S}} - \left[0,044 \cdot \left(\frac{A}{B}\right)\right] = 0,581 \quad (11.63)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8 \cdot h}{\sqrt{S}} + \left[\left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}}\right) \cdot \left(\frac{A}{B}\right)\right] = 2,5 \quad (11.64)$$

$$R = \frac{\rho_{eq}}{\pi \cdot L} \left[\ln\left(\frac{2L}{\sqrt{h \cdot d}}\right) + \frac{K_1 \cdot L}{\sqrt{S}} - K_2 \right] = 12,876 [\Omega] \quad (11.65)$$

La resistencia de puesta a tierra cumple con la normativa ya que es menor a 20 $[\Omega]$. Lo que faltaría por definir es si una vez interconectada al neutro de la red resulta ser inferior a 5 $[\Omega]$ o no. Para llevar a cabo eso es recomendable medir las otras puestas a tierra de servicio que ya están instaladas cerca del sector, de existir puestas a tierra de baja resistencia podría ser posible que si cumpla con lo establecido. En caso de que no sea así habría que rediseñar nuevamente la puesta a tierra para que esta presente una resistencia menor o inferir en mejoramientos del terreno como podría ser el uso de aditivos químicos. Además, hay que tener presente para la implementación la distancia entre puestas a tierra de servicio de máximo 200 [m] establecidas por norma. En el caso de la sección del conductor ya que la escogida para el diseño preliminar es de 33,6 $[\text{mm}^2]$ esta cumple con la normativa mayor que 21 mm^2 .

12 CONCLUSIONES

El correcto estudio e interpretación de las mediciones realizadas en el terreno es crucial para el diseño de las puestas a tierra. Ya que será el valor de la resistividad equivalente del terreno, en conjunto con el diseño preliminar, quien definirá la resistencia que presenta la puesta a tierra. Cometer algún error en el desarrollo para obtener la estratificación del suelo podría conllevar a dimensionar una puesta a tierra de manera equivocada, sobredimensionándola, lo cual generaría mayores costos, o subdimensionándola, lo cual generaría riesgos de ser usada como tal o provocaría que una vez implementada tuviese que ser retirada y rediseñada nuevamente.

Si bien, el desarrollo de los cálculos posteriores a la estratificación no presenta gran complejidad, hay que desarrollarlos con meticulosidad debido a que aparecen muchas variables y formulas las cuales hay que comprender para no cometer errores. Considerar el área donde se instalará la puesta a tierra para realizar un diseño acorde a ella y posterior desarrollo correspondiente al tipo de puesta a tierra diseñada.

Tanto la malla a tierra de protección como la puesta a tierra de servicio deben presentar un bajo valor de resistencia, menor a 20 $[\Omega]$ según lo indica la norma nacional. Hay que tener en consideración que además de dicho valor de resistencia, la malla a tierra de protección debe cumplir siempre con la exigencia de presentar valores de tensión de malla y periferia inferiores a los valores de tensión de paso y contacto máximos permisibles para el ser humano, de manera tal que no se pase el umbral de fibrilación cardiaca ni se ponga en riesgo la vida del personal que se encuentre trabajando o de las personas que circunden el sector. Y la resistencia de puesta a tierra de servicio además de tener un valor menor a 20 $[\Omega]$, una vez interconectada al neutro, debe presentar una resistencia inferior a 5 $[\Omega]$ con la finalidad de mantener un nivel de referencia cero en el neutro del transformador. En el caso que no se cumplan estas exigencias es necesario un rediseño de la puesta a tierra tomando en consideración los factores que pueden ayudar a reducir la resistividad de la puesta a tierra o las tensiones de paso y de contacto, como aumentar el área abarcada por la puesta a tierra, añadir barras verticales, disminuir el reticulado añadiendo más conductores, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] La puesta a tierra de instalaciones eléctricas, Rogelio García Márquez.
- [2] Mallas de tierra, adaptación y traducción de publicación 119 de la Copper Development Association, Inglaterra “Earthing Practice” efectuada por Nelson Morales Osorio.
- [3] IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding, R. Keil, J. Merryman.
- [4] M. Navarro, “Mallas a Tierra”, Universidad de La Frontera, Chile 2008.
- [5] D. Henríquez, “Estudio y diseño de malla a tierra BT – MT”, SOCAP S.A, Chile 2010.
- [6] J. Valenzuela, C. Valenzuela, “Diseño y cálculo de puestas a tierra”, Ingeniería DICTUC, Chile 2012.
- [7] NCH Elec. 4/2003, “Electricidad. Instalaciones de consumo en baja tensión”, Chile 2003.
- [8] SEC, “Reglamento de seguridad de las instalaciones eléctricas”, Chile 2020.
- [9] NSEG 20 E.p 78, “Electricidad. Subestaciones transformadoras interiores”. Chile 1978.
- [10] E. Orellana, H. Mooney, “Master Tables and Curves for Vertical Electrical Soundind over layered structures”, España 1966.