



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA ENERGÍA

**DISEÑO DE MALLA A TIERRA PARA UN TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUCIÓN DE 45 KVA.**

Profesor guía: José Gómez Vega

Edmundo Gabriel Gómez Marcoleta

Ricardo Iván Collado Rojas

Copiapó, Chile 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA ENERGÍA

**DISEÑO DE MALLA A TIERRA PARA UN TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUCIÓN DE 45 KVA.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Técnico Universitario en electricidad

Profesor guía: José Gómez Vega

Edmundo Gabriel Gómez Marcoleta

Ricardo Iván Collado Rojas

Copiapó, Chile 2022

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcances.....	2
1.4 Metodología.....	2
1.5 Normativas.....	3
CAPÍTULO II.....	4
ANTECEDENTES TÉCNICOS.....	4
2.1 Puesta a tierra.....	4
2.2 Objetivos de una puesta a tierra.....	4
2.3 Requisitos de una puesta a tierra.....	4
2.4 Tensión de paso y de contacto.....	5
2.4.1 Tensión de contacto.....	5
2.4.2 Tensión de paso.....	5
2.5 Efectos de paso de corriente por el cuerpo humano.....	6
2.6 Definición de resistividad.....	8
2.7 Factores que afectan la resistividad.....	8
2.7.1 Naturaleza del terreno.....	8
2.7.2 Humedad.....	9
2.7.3 Temperatura.....	9
2.7.4 Salinidad.....	9
2.7.5 Estratigrafía de terreno.....	9
2.7.6 Compactación del terreno.....	9
2.8 Método Wenner.....	9
2.8.1 Normas de medición.....	9
2.8.2 Funcionamiento del método.....	10
2.9 Método Schlumberger.....	10
2.9.1 Normas de medición.....	10
2.9.2 Funcionamiento del método.....	11

2.10 Método de caída de potencial.	11
2.11 Instrumento de medición.	12
2.11.1 Accesorios para las mediciones.	12
2.12 descripción de IPI2Win.	13
2.13 Soldadura exotérmica.	13
2.14 Uniones exotérmicas.	13
2.15 Métodos para reducir la resistividad del terreno.	14
2.15.1 GEO GEL 8+ M.R.	14
2.15.2 Método de aplicación de geo gel.	15
2.15.3 Bentonita.	15
2.15.4 Cemento conductor.	16
2.16 Mantenimiento de sistema de puesta a tierra.	17
CAPÍTULO III	18
CÁLCULO DE RESISTIVIDAD DE TERRENO	18
3.1 Dimensionamiento del terreno método Wenner.	18
3.2 dimensionamiento método Schlumberger.	20
3.3 Cálculo de la resistividad equivalente.	22
3.3.1 Cálculo de la resistividad equivalente con datos obtenidos del método Wenner.	23
3.3.2 Cálculo de la resistividad equivalente con datos obtenidos del método Schlumberger.	23
CAPÍTULO IV	24
CÁLCULO DE RESISTENCIA GENERAL	24
4.1 Diseño de la malla a tierra M.T.	24
4.2 Características de la malla.	24
4.3 Materiales a utilizar.	24
4.4 Resistencia malla puesta a tierra.	25
4.4.1 Resistencia puesta a tierra método Wenner.	27
4.4.2 Resistencia puesta a tierra Método Schlumberger.	27
4.5 Resistencia de la malla aplicando el método de caída de potencial.	28
4.6 Análisis de resultados.	28
CAPÍTULO V	29
CONCLUSIÓN	29

BIBLIOGRAFÍA	30
Anexo N°1	32
Mediciones de terreno método Wenner	32
Mediciones de terreno método Wenner	33
Anexo N°2.....	34
Mediciones de terreno método Schlumberger	34
Mediciones de terreno método Schlumberger.....	35
Anexo N°3.....	36
Método de caída de potencial	36

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Terreno de estudio.....	2
Figura 2.1 Tensión de paso, contacto.....	5
Figura 2.2 Efecto sobre la piel.....	7
Figura 2.3 Valores orientativos de la resistividad en función del terreno.....	8
Figura 2.4 Método Wenner.	10
Figura 2.5 Método Schlumberger.	11
Figura 2.6 Método caída de potencial.	12
Figura 2.7 Instrumento de medición.	12
Figura 2.8 Soldadura exotérmica.....	13
Figura 2.9 Uniones exotérmicas.....	14
Figura 2.10 GEO GEL 8+ M.R.	15
Figura 2.11 Bentonita.....	16
Figura 2.12 Cemento conductivo.....	16
Figura 3.1 Curva teórica no ajustada.	19
Figura 3.2 Gráfico corregido IPI2win modelamiento de tres capas.	19
Figura 3.3 Curva teórica no ajustada.	21
Figura 3.4 Grafico corregido IPI2win modelamiento de tres capas.	21
Figura 4.1 Diseño de malla a tierra.....	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Intensidad de corriente.....	7
Tabla 3.1 Mediciones de terreno con método Wenner.	18
Tabla 3.2 Datos de resistividad y espesor de las capas del terreno.	19
Tabla 3.3 Mediciones de terreno método Schlumberger.	20
Tabla 3.4 Datos de resistividad y espesor de las capas del terreno.	21
Tabla 3.5 Resultados de resistividad equivalente método Wenner.	23
Tabla 3.6 Resultados de resistividad equivalente método Schlumberger.	23
Tabla 4.1 Datos para calcular la resistencia general.	25
Tabla 4.2 Resultados de resistencia método Wenner.....	27
Tabla 4.3 Resultados de resistencia método Schlumberger.	27

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es diseñar una puesta a tierra tipo malla para un transformador de distribución de 45 KVA, ubicado en las dependencias de la Universidad de Atacama, Copiapó.

En el primer capítulo se dio a conocer la introducción, los objetivos de este estudio, el alcance, la metodología a utilizar, las dimensiones del terreno en la cual se basa el diseño así como también las normativas por las cuales se rige.

Siguiendo con el desarrollo de éste en el segundo capítulo se lleva a cabo todos los antecedentes técnicos necesarios que se necesitan para la elaboración del diseño ya sea los tipos de mediciones de resistividad de terreno, así como también conceptos básicos que se deben tener en cuenta como el concepto de puesta a tierra.

Dentro del tercer capítulo se da a conocer las mediciones de resistividad del suelo que se obtienen, el modelamiento del suelo mediante el software IPI2Win y además se calcula la resistividad equivalente del terreno con los datos obtenidos mediante el método de Burdoff - Yakobs.

En el cuarto capítulo vemos el diseño de la malla a tierra que se propuso y además se calcula la resistencia total que se obtiene mediante el método de Scharwz.

Y finalmente en el quinto capítulo nos encontramos con la conclusión en la cual se determinó que el diseño cumple con lo estipulado en la normativa además de analizar que para los cálculos teóricos es mejor hacer un modelamiento del suelo mediante el método Wenner. El valor resultante de la puesta a tierra fue de $3,55[\Omega]$.

ABSTRACT

The objective of this project is the design of a mesh-type grounding for a 45 KVA distribution transformer, located in the facilities of the Universidad de Atacama, Copiapó.

In the first chapter, the introduction, the objectives of this study, the scope, the methodology to be used, the dimensions of the land on which the design is based, as well as the regulations by which it is governed, were disclosed.

Continuing with the development of this, in the second chapter all the necessary technical base that is needed for the development of the design is made, be it the types of ground resistivity measurements, as well as basic concepts that must be taken into account, as the concept of grounding.

Within the third chapter, the soil resistivity measurements obtained are disclosed, the soil modeling using the IPI2Win software and the equivalent soil resistivity is also calculated with the data obtained using the Burdoff - Yakobs method.

In the fourth chapter we see the design of the ground mesh that can be used and also the total resistance obtained by the Scharwz method is calculated.

And finally in the fifth chapter we find the conclusion in which it will be extended that the design complies with the provisions of the regulations in addition to analyzing that for theoretical calculations it is better to model the soil using the Wenner method. The resulting value of grounding was 3,55[Ω].

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La puesta a tierra es algo básico e indispensable dentro de cualquier instalación eléctrica, así como también en equipos eléctricos debido a que es una medida de seguridad que nos protege ante cualquier descarga que nos pueda crear alguna lesión ya sea de carácter menor o incluso hasta la muerte y para ello este proyecto se basa en el diseño de una puesta a tierra para un transformador de distribución. Al ser un diseño para un transformador del lado de media tensión se va a necesitar un diseño de puesta a tierra de tipo malla que cumpla con la normativa chilena actual para su aprobación, correcto funcionamiento y que cumpla las condiciones para que sea segura su instalación a futuro. El primer paso que se lleva a cabo para diseñar la malla es la determinación del área en donde se piensa proyectar esta, para así poder conocer el largo y su ancho y así realizar las mediciones de la resistividad del terreno mediante el método Wenner y método Schlumberger. Después hacer el plan de mediciones donde indicas cuantas mediciones necesitas especificando su largo y así preparar lo necesario. Después de esto se hacen las mediciones del terreno que nos va a permitir obtener diferentes valores de resistividad del terreno. Lo siguiente que se hace es el modelamiento del terreno mediante el software IPI2win el cual nos da a conocer datos como la curva patrón, el número de capas que tiene el terreno, así como también su espesor. Después de obtener los datos se debe hacer una propuesta de malla que abarque el área, el largo y ancho y con estos datos más los obtenidos anteriormente con el modelamiento del suelo se calcula la resistividad equivalente que tendría esta malla mediante el método de Burdoff - Yakobs. Por último, para conocer si el diseño de la malla a tierra cumple con la normativa chilena vigente se calcula la resistencia general de la puesta a tierra mediante el método de Schwarz.

1.1 Objetivo general.

Diseñar una puesta a tierra tipo malla para un transformador de distribución de 45 KVA.

1.2 Objetivos específicos.

- Describir los antecedentes técnicos, metodologías, equipos para la medición de resistividad de terreno.

- Obtener mediciones de resistividad de terreno, mediante los métodos de Wenner y Schlumberger.
- Calcular la resistividad del terreno utilizando el método de Burdoff -Yakobs.
- Diseñar la malla a tierra bajo el decreto supremo N°9 año 2018.

1.3 Alcances.

Este diseño de malla a tierra será para un transformador de 45 KVA. Este transformador estará ubicado en las dependencias de la Universidad De Atacama para ser más exactos en -27.360774 , -70.352212 y las mediciones de terreno se realizaron el 7 de octubre del año 2022 con una temperatura de $29\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 1.1 Terreno de estudio



Este terreno se encuentra ubicado a los pies del cerro y si bien en la figura 1.1 no se puede observar detalladamente este un terreno poco rocoso, con tierra compactada y que a un costado tiene vegetación por lo cual es regado constantemente. Tiene una dimensión de 50 metros de largo y 20 metros de ancho.

1.4 Metodología.

Las mediciones a terreno para obtener la resistividad de este se hicieron a través del método Wenner y también del método Schlumberger, para esto se ocupó un telurómetro AEMC-6470. Para el método Wenner se realizaron 7 mediciones de forma horizontal con una separación de los electrodos de misma longitud y para el método Schlumberger 11 mediciones en las cuales los electrodos de corriente se mantuvieron siempre a un metro y los electrodos de potencial se fueron moviendo a una misma longitud. Con estas

mediciones se hará uso del Software IPI2Win para obtener un modelamiento del campo, así como las resistividades de las capas y su espesor. Con los datos obtenidos del Software se calculará mediante la ayuda de una hoja de cálculo en Excel la resistividad aparente del terreno y la resistencia de la puesta a tierra.

1.5 Normativas.

- El diseño de la malla a tierra estará regulado bajo la normativa chilena decreto N°8,2019 específicamente bajo el pliego técnico N°6.
- La medición de la resistividad del terreno se llevará a cabo mediante lo recomendado en el pliego técnico N°6.
- El modelamiento del suelo se llevará a cabo mediante lo recomendado en la IEEE 80-2013 así como también el cálculo de la resistividad equivalente y la resistencia general del conjunto de puesta a tierra.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES TÉCNICOS

En este capítulo veremos todos los antecedentes que se necesitan para poder comprender que es un sistema de puesta a tierra y como se elabora.

2.1 Puesta a tierra.

La puesta a tierra es una parte importante de cualquier instalación eléctrica ya que es un mecanismo de seguridad en las instalaciones eléctricas y que su función principal es conducir los desvíos de la corriente hacia la tierra, evitando que la persona entre en contacto con la electricidad.

2.2 Objetivos de una puesta a tierra.

El objetivo principal de una puesta a tierra es el de dar seguridad a las personas en caso de alguna falla, pero también tiene otros objetivos como proteger instalaciones, equipos y materiales a través de la buena operación de dispositivos de protección, todo esto a través de un buen funcionamiento de la puesta a tierra en donde esta conduzca a tierra las corrientes de fuga que se puedan producir.

2.3 Requisitos de una puesta a tierra.

Aunque un sistema eléctrico puede operar sin una puesta a tierra, estas se utilizan de igual forma ya que como se menciona anteriormente es un mecanismo de seguridad, es por esto por lo que los requisitos de una puesta a tierra según PROCOBRE, 2013 serían:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que seres vivos presentes en la vecindad de las subestaciones no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica de las aislaciones.

2.4 Tensión de paso y de contacto.

Estas tensiones son consideradas como las posibles causas en las que están expuestas las personas, así como también seres vivos que se encuentran interactuando con redes eléctricas, de los diferentes sistemas de distribución. Si bien estas se pueden ocasionar de manera accidental o intencionadas pueden generar desde un cosquilleo, una electrocución y en algunos casos hasta la muerte. Las tensiones de paso y contacto no están consideradas en los cálculos de nuestro trabajo, pero de igual forma se mencionan ya que es importante conocer que son.

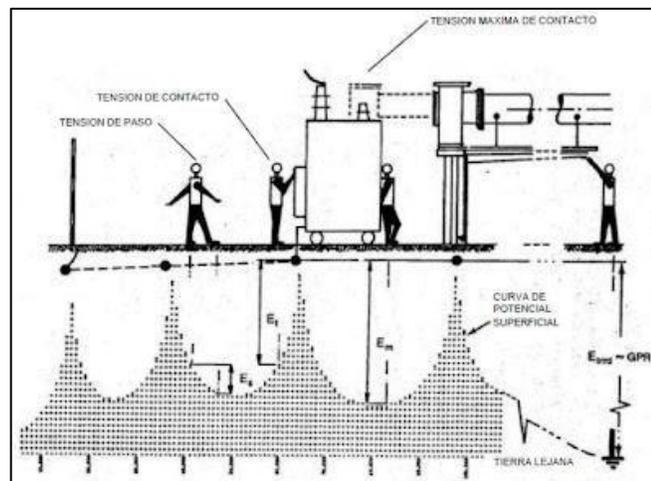
2.4.1 Tensión de contacto.

Como se describe en el decreto supremo N° 8, 2019 la tensión de contacto es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial de tierra y el potencial de superficie en el punto en que una persona está de pie, mientras que al mismo tiempo tiene una mano o parte de su cuerpo en contacto con una estructura conectada a tierra.

2.4.2 Tensión de paso.

Como se describe en el decreto supremo N° 8, 2019 la tensión de paso es la diferencia de potencial que experimenta una persona con una separación de un metro entre sus pies, sin tocar ningún objeto conectado a tierra.

Figura 2.1 Tensión de paso, contacto.



Fuente: IEEE 80 (2013)

2.5 Efectos de paso de corriente por el cuerpo humano.

Las consecuencias del paso de corriente por el cuerpo pueden provocar desde lesiones físicas secundarias como golpes, caídas entre otros hasta la muerte debido a una fibrilación ventricular. Todo va a depender del tipo de corriente, la intensidad, el tiempo de contacto, la resistencia particular del cuerpo, el voltaje y la trayectoria que tome la corriente a través del cuerpo. Una persona está electrificada cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno para la entrada y otro para la salida de la corriente. Las consecuencias del paso de la corriente eléctrica pueden ser muy diversas, Tenemos consecuencias directas que pueden ser quemaduras por arco o contacto, efectos musculares y nerviosos como calambres, contracturas musculares, tetanización de los músculos respiratorios, fibrilación ventricular o inhibición de centros nerviosos.

- La electrocución se produce cuando una persona fallece debido al paso de la corriente por el cuerpo.
- Fibrilación ventricular consiste en un ritmo cardíaco rápido, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y, aunque esté en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento.
- Por tetanización se entiende que es el movimiento incontrolado de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, entre otros.
- La asfixia se produce cuando el paso de la corriente afecta al centro nervioso que regula la función respiratoria lo cual ocasiona un paro respiratorio.

También pueden aparecer efectos secundarios que afecten las funciones cerebrales, motoras, circulatorias, problemas renales, trastornos mentales, neuróticos, entre otros. A continuación, se muestra en la tabla 2.1 las consecuencias del paso de mA por el paso del cuerpo humano.

Tabla 2.1 Intensidad de corriente.

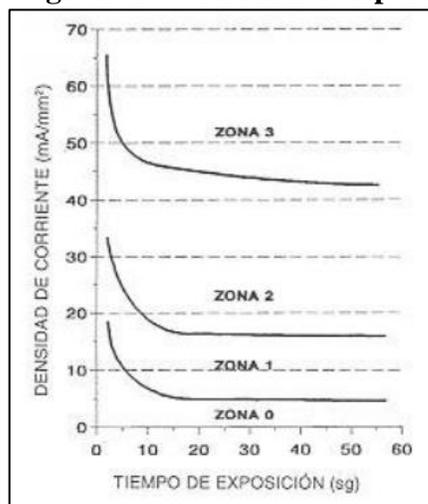
Intensidad de corriente	Efectos
Hasta 1 mA	Imperceptible para el hombre
De 2 a 3 mA	Sensación de hormigueo
De 3 a 10 mA	El sujeto se desprende del contacto
De 10 a 50 mA	No es mortal durante poco tiempo
De 50 a 500 mA	Fibrilaciones y quemaduras internas
Más de 500 mA	Muerte por parálisis de centro nervioso

Como se puede apreciar en la tabla 2.1 dependiendo de la intensidad que pase por tu cuerpo puedes tener efectos diferentes desde hormigueos hasta muerte por parálisis de centro nervioso.

Como se puede apreciar en la figura 2.2 al pasar corriente por la persona tenemos diferentes efectos sobre la piel siendo estos catalogados como:

- Zona 0: No hay alteración de la piel, a no ser que el tiempo de exposición sea de varios segundos, en caso puede tomar un color grisáceo con superficie rugosa.
- Zona 1: se va a producir un enrojecimiento de la piel además de una hinchazón en los bordes.
- Zona 2: se provoca una coloración parda de la piel
- Zona 3: se puede provocar una carbonización de la piel.

Figura 2.2 Efecto sobre la piel.



Fuente: NTP 400

2.6 Definición de resistividad.

Para definir la resistividad se debe saber primeramente que el suelo es un conductor de electricidad y por esto como se menciona en el DS N°8, 2019 la resistividad 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. Además, es importante saber que esta no es única a va a variar según el tipo de terreno, no es lo mismo la resistividad en un suelo seco, poco fértil que en un suelo húmedo y fértil.

2.7 Factores que afectan la resistividad.

Como se menciona anteriormente la resistividad no es igual en todas partes a esta varía según el tipo de terreno, no es igual en todas partes ni tampoco es siempre de esta forma es por esto por lo que existen diferentes factores que pueden afectar la resistividad del terreno como:

2.7.1 Naturaleza del terreno.

Dependiendo del terreno la resistividad irá variando. Como se puede observar en la figura 2.3 el valor orientativo de la resistividad en turba húmeda es de 5 a 100, en calizas blandas es de 100 a 300 ohm*m, en caliza compacta de 1000 a 5000 ohm*m. Con esto se concluye que la resistividad no es una constante y va a variar en función de la naturaleza del terreno.

Figura 2.3 Valores orientativos de la resistividad en función del terreno.

Naturaleza terreno	Resistividad en Ohm.m
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arenas arcillosas	50 a 500
Arena silícea	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 5.00
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1.500 a 10.000
Granito y gres muy alterado	100 a 600

Fuente: D.S. N°8 (2019)

2.7.2 Humedad.

La humedad es inversamente proporcional a la resistividad del terreno, es decir a mayor humedad más bajo será el valor de la resistividad. Es por esto por lo que en terrenos fértiles o húmedos la resistividad es más baja que en terrenos poco fértiles y secos. Por esto en días de lluvia se recomienda esperar unos días para hacer mediciones.

2.7.3 Temperatura.

La temperatura es inversamente proporcional a la resistividad, es decir que la cuando la temperatura sea menor la resistividad va a aumentar. Es por esto por lo que las mediciones se recomiendan hacerlas con un buen clima.

2.7.4 Salinidad.

La salinidad también es un factor que incide ya que si aumenta la salinidad la resistividad del terreno tiende a disminuir, es por esto que para el mejoramiento del terreno se utilizan sales electrolíticas.

2.7.5 Estratigrafía de terreno.

Los terrenos están formados por diferentes capas con diferentes resistividades es por esto por lo que la resistividad será un conjunto de estas diferentes capas y sus espesores.

2.7.6 Compactación del terreno.

Cuando se tiene el terreno con una compactación mayor disminuye la resistividad y esto se debe a que el electrodo está haciendo un buen contacto con el terreno.

2.8 Método Wenner.

El método Wenner es un método para medir la resistividad del suelo.

2.8.1 Normas de medición.

Para realizar una buena medición y que sea la más precisa posible, se necesita cumplir con los siguientes factores:

- Disponer de 4 electrodos o también conocidos como picas para clavar en el suelo.
- Colocar los cuatro electrodos de forma recta con la misma separación entre ellos.

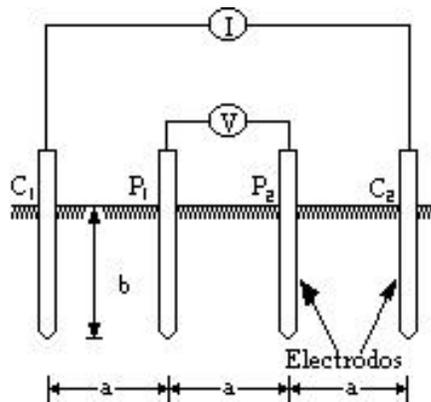
- Clavarlos a la misma profundidad.

La resistividad del terreno variará en función de las distancias “a” que se hayan dejado como separación entre electrodos y también del tipo de terreno.

2.8.2 Funcionamiento del método.

Una vez clavados los electrodos en el terreno como se muestra en la figura 2.4 se empezará a realizar los cálculos. El telurómetro inyecta una corriente directa o de baja frecuencia que atraviesa la tierra a través de los electrodos C1, C2. Mientras, ira midiendo la diferencia de potencial que hay entre las picas P1 y P2. En este método los cuatro electrodos se mueven a una distancia a igual para todos.

Figura 2.4 Método Wenner.



Fuente: Ruelsa (2013)

2.9 Método Schlumberger.

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner y se ocupa para medir la resistividad del suelo.

2.9.1 Normas de medición.

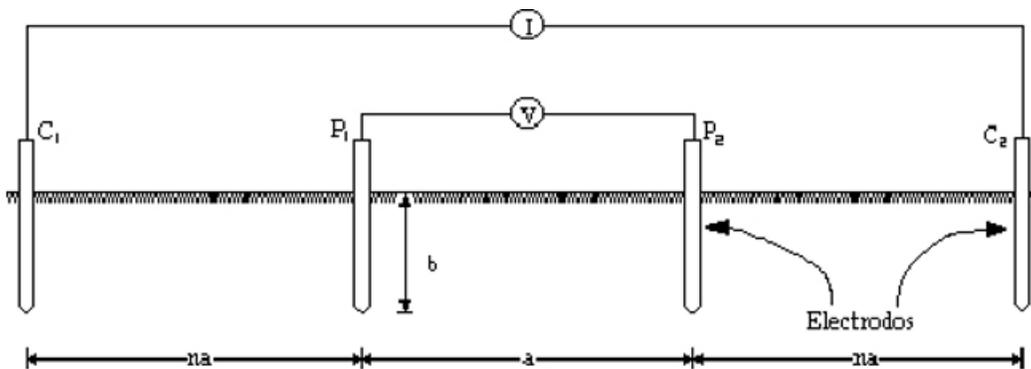
Para realizar una buena medición y que sea la más precisa posible, se necesita cumplir con los siguientes factores:

- Al igual que en el método Wenner se necesitan 4 electrodos para clavar en el suelo.
- Tener dos electrodos externos denominados como de corriente y dos electrodos internos denominados de potencial.

2.9.2 Funcionamiento del método.

En este caso como se puede observar en la Figura 2.5 la separación entre los electrodos centrales o de potencial P1 y P2 se va a mantener constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores C1 y C2 a partir de los electrodos inferiores, a una distancia na de la separación base de los electrodos internos, esto quiere decir que los electrodos centrales se mantienen a una separación constante entre ellos y los electrodos exteriores se moverán la misma distancia na .

Figura 2.5 Método Schlumberger.

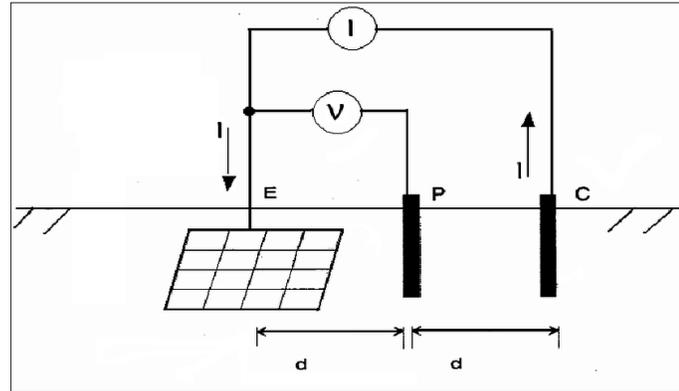


Fuente: Ruelsa (2013)

2.10 Método de caída de potencial.

El método de caída de potencial se debe hacer antes de poner el sistema en funcionamiento y sirve para calcular la resistencia de la puesta a tierra mediante la ley de ohm. Este consiste en pasar una corriente entre el sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar C y medir la tensión entre la puesta a tierra y un electrodo de potencial auxiliar P colocado en la misma dirección del electrodo de corriente. La distancia del electrodo de potencial va a un 62% de la puesta a tierra respecto a la distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra, es por esto por lo que también se le conoce como el método del 62%.

Figura 2.6 Método caída de potencial.



Fuente: Vallejos (2007)

2.11 Instrumento de medición.

Para realizar las mediciones de resistividad del suelo utilizamos el instrumento de medición marca AEMC-6470.

2.11.1 Accesorios para las mediciones.

Los accesorios utilizados son:

- 4 estacas de cobre.
- 2 cables de 50 metros conexión electrodo de corriente.
- 2 cables de 30 metros conexión electrodo de potencial.
- 4 conectores para los cables.
- 1 huincha platica de medir de 50mts.

Figura 2.7 Instrumento de medición.



2.12 descripción de IPI2Win.

IPI2Win está diseñado para la interpretación automática o semiautomática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos con varios de los arreglos utilizados con más frecuencia en la prospección eléctrica.

2.13 Soldadura exotérmica.

Las soldaduras exotérmicas son fabricadas con componentes como óxido de cobre y aluminio. Especialmente diseñadas para fusiones entre elementos de cobre y acero, o una combinación de ambas. El disco metálico que servirá para mantener el polvo de la carga en el crisol hasta la reacción viene suministrado dentro del empaque de la carga para evitar posibles extravíos y la Cápsula de Fulminante es suministrada para su fácil ubicación.

Figura 2.8 Soldadura exotérmica.



Fuente: IMERSA (2022)

2.14 Uniones exotérmicas.

Las uniones exotérmicas es el resultado de un proceso químico por el cual se unen 2 o más conductores. Estas uniones se realizan a través de un molde de grafito que se diseña considerando el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando detonador o algún tipo de llama se enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre, la reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito y la reacción que se crea forma una unión de cobre que posee una gran conductividad y es como si solo existiera un conductor, no pierde conductividad. Los moldes si se ocupan y mantienen adecuadamente, pueden usarse para realizar entre 50 y 70 uniones. Este tipo de unión asegura los siguientes beneficios:

- Proporciona una unión permanente, de baja resistencia eléctrica y que además es resistente a la corrosión.
- La técnica que se ocupa no requiere adiestramiento, relativamente.
- Puede operar a alta temperatura, esto permite eventualmente reducir el calibre del conducto.

Figura 2.9 Uniones exotérmicas.



Fuente: Aplicaciones tecnológicas S.A

2.15 Métodos para reducir la resistividad del terreno.

Lo que se busca al tratar de reducir la resistividad del terreno es reducir la resistencia de la puesta a tierra ya sea que en caso de que la malla a tierra propuesta no cumpla con los requerimientos o también si se quiere obtener un valor de resistencia más bajo. Para esto es necesario utilizar materiales no corrosivos que afecten a la instalación de la puesta a tierra y a continuación veremos los siguientes ejemplos:

2.15.1 GEO GEL 8+ M.R.

Es un aditivo de tierra natural higroscópica no corrosivo el cual modifica el comportamiento eléctrico de los suelos bajando los niveles de resistividad de las capas componentes del terreno tratado reduciendo así la resistencia eléctrica a un 70% para terrenos de resistividad alta y de 40% para los terrenos de baja resistividad eléctrica, esto quiere decir que a mayor resistividad más efectivo es el producto.

Figura 2.10 GEO GEL 8+ M.R.



FUENTE: Sod. Ind. Minera GEO SINTER LTDA

2.15.2 Método de aplicación de geo gel.

EL modo de aplicar el producto es primeramente saber las dimensiones de la malla para así llevar a cabo la excavación del pozo, se espolvorea el geo gel en la superficie donde se instalará la malla, Se instala barra y conductores, Se vierten los sacos de geo gel que son de 7 kg que sirven para tres metros lineales de electrodos o cables puestos en la malla, se cubren bien los electrodos o mallas aproximadamente entre unos 3 a 5 centímetros de geo gel, se le agrega agua con una dosificación de 20 litros por cada 7 kilos de geo gel, se deja reposar hasta obtener una pasta homogénea y luego se rellena hasta el nivel del suelo con una mezcla del 70% de la tierra sacada de la excavación y el 30% de geo gel y finalmente se le agrega agua cubriendo la superficie de la excavación.

2.15.3 Bentonita.

La principal razón por la que se usa es porque puede absorber la humedad lo cual ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo de los años y tampoco es corrosiva. Esta es una arcilla de color pardo y de formación natural. La Bentonita es una arcilla compuesta por múltiples minerales y con propiedades muy especiales. Es de grano muy fino y soluble en ácidos.

Figura 2.11 Bentonita.



Fuente: Bentonita (2019)

2.15.4 Cemento conductivo.

El cemento conductivo reduce de forma efectiva y permanente la resistencia de puestas a tierra. Este mejora las puestas a tierra en cualquier tipo de suelo, inclusive durante periodos secos. Las propiedades que tiene son que no se disuelve ni se descompone con el paso del tiempo, es un producto ecológico que no contiene componentes perjudiciales para la salud de la persona que lo manipula, no requiere mantenimiento, no depende de la presencia continua de agua para su conductividad, es de fácil manejo por lo que solo requiere una persona para su instalación, se solidifica de manera inmediata, puede reducir el tamaño del sistema de tierra en donde los métodos convencionales no son satisfactorios, evita el robo, pues los electrodos y cables quedan mezclados en concreto y para sacarlos sería muy complicado.

Figura 2.12 Cemento conductivo.



Fuente: Enercond (2022)

2.16 Mantenimiento de sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra con el paso del tiempo van perdiendo su efectividad debido a la corrosión, fallas eléctricas o también por daños mecánicos que se pueden producir en uniones o en los conductores, es por esto que resulta muy importante que cada cierto tiempo sean sometidos a un mantenimiento. Para esto podemos ver que:

- Periódicamente se debe medir la resistencia para revisar si mantienen las mismas condiciones de diseño. Es recomendable hacer una medición anual y de no practicarla máximo cada tres años.
- Realizar excavaciones para poder determinar el estado en el que se encuentran los conductores y las uniones, esto se debe realizar máximo cada cinco años
- En caso de que las condiciones no sean iguales al diseño original este debe ir actualizándose para tener en conocimiento el estado.
- Si se dan las condiciones también realizar la medición de la tensión de paso y contacto.

Todos estos puntos servirán para conocer las condiciones generales del sistema, para determinar si existe o no corrosión, conocer el estado de conductores y uniones, la resistencia que entrega el sistema y en caso de que no cumpla lo estipulado y necesite un rediseño o una mejora esto queda en conocimiento.

CAPÍTULO III

CÁLCULO DE RESISTIVIDAD DE TERRENO

En este capítulo primeramente se obtendrá el modelamiento del suelo mediante las mediciones obtenidas mediante el método Wenner y el método Schlumberger utilizando el instrumento mencionado en el punto 2.11 para así después con estos datos poder calcular la resistividad equivalente del terreno.

3.1 Dimensionamiento del terreno método Wenner.

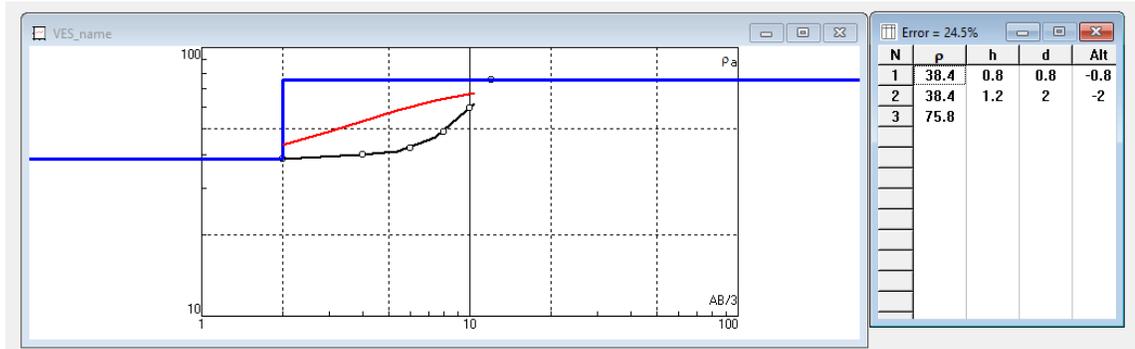
Teniendo en cuenta la dimensión del terreno se realizaron 7 mediciones utilizando el método Wenner, en el cual todos los electrodos se mueven a una misma distancia y del cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.1 Mediciones de terreno con método Wenner.

N°	n (m)	R (Ω)	ρ (Ω m)
1	2	3,06	38,4
2	4	1,59	40
3	6	1,11	42
4	8	0,96	48,3
5	10	0,94	59,2
6	12	1,01	75,8
7	16	1,2	120

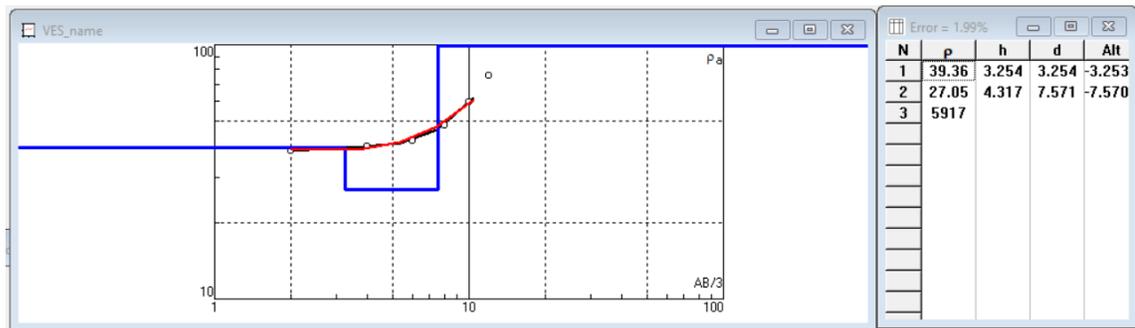
Como se puede observar en la tabla 3.1 se indica el número de medición en donde n sería la separación de los electrodos, R sería la resistencia y ρ sería la resistividad. Con la ayuda del software "IPI2win" se grafica la curva de campo correspondiente a las mediciones realizadas. Al momento de traspasar los datos obtenidos al software se obtiene el siguiente gráfico:

Figura 3.1 Curva teórica no ajustada.



Como se puede observar en la figura 3.1, se obtiene una curva teórica no ajustada a la curva del campo con un error de ajuste de 24,5 % de acuerdo con la diferencia relativa entre la curva teórica y la de resistividad de curva aparente real. El software nos permite visualizar la curva patrón de nuestro terreno, capas del suelo, las resistividades aparentes y espesor de las capas.

Figura 3.2 Gráfico corregido IPI2win modelamiento de tres capas.



Al hacer el modelamiento de tres capas y asemejar lo más posible nuestra curva a una de las curvas patrón, se obtiene un error aceptable de 1,99%, como se puede observar en la figura 3.2 los datos obtenidos serían los siguientes:

Tabla 3.2 Datos de resistividad y espesor de las capas del terreno.

Resistividad de la capa (Ωm)	Espesor de la capa (m)
ρ_1 : 39,36 Ωm	E1: 3,254 m
ρ_2 : 27,05 Ωm	E2: 4,317 m
ρ_3 : 5917 Ωm	E3: ∞

3.2 dimensionamiento método Schlumberger.

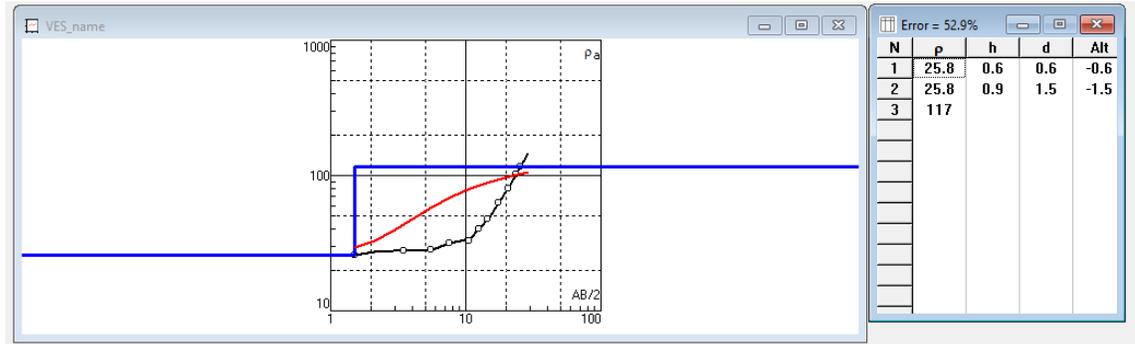
Se realizaron 11 mediciones utilizando el método Schlumberger, en estas mediciones los electrodos de potencial se mantuvieron a una distancia de un metro siempre y para obtener una correcta medición en el equipo se va a colocar el valor de $AB/2$ que corresponde a la separación de los electrodos de potencial con los electrodos de corriente, pero tomando el centro de los electrodos de potencial. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3.3 Mediciones de terreno método Schlumberger.

N°	n (m)	AB/2 (m)	R (Ω)	ρ (Ω m)
1	1	1,5	4,11	25,8
2	3	3,5	0,74	28
3	5	5,5	0,30	28,3
4	7	7,5	0,18	31,7
5	10	10,5	0,10	33
6	12	12,5	0,08	39,9
7	14	14,5	0,07	47,4
8	17	17,5	0,06	62,3
9	20	20,5	0,06	80,5
10	23	23,5	0,06	101
11	25	25,5	0,06	117

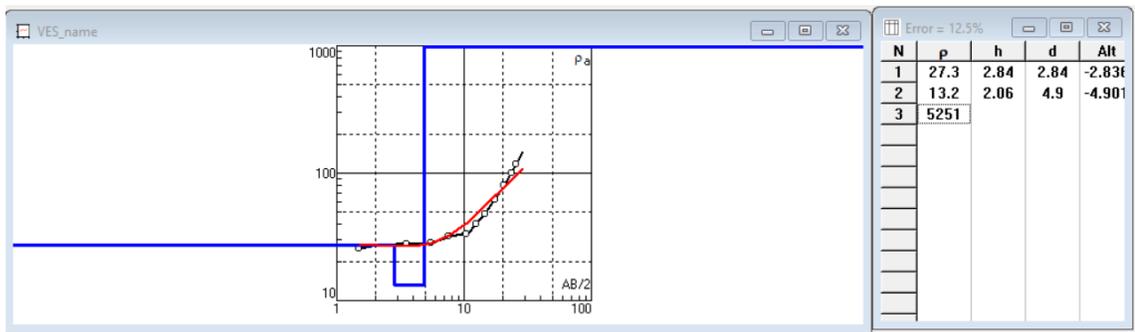
Como se puede observar en la tabla 3.3, N° indica el número de medición, n corresponde a la separación de los electrodos de corriente con los de potencial, R sería la resistencia y ρ sería la resistividad. Con la ayuda del software "IPI2win" se grafica la curva de campo correspondiente a las mediciones realizadas y al momento de traspasar los datos obtenidos al software se obtiene el siguiente gráfico:

Figura 3.3 Curva teórica no ajustada.



Como se puede observar en la figura 3.3, se obtiene una curva teórica no ajustada a la curva del campo con un error de ajuste de 52,9% % de acuerdo con la diferencia relativa entre la curva teórica y la de resistividad de curva aparente real. El software nos permite visualizar la curva patrón de nuestro terreno, capas del suelo, las resistividades aparentes y espesor de las capas.

Figura 3.4 Grafico corregido IPI2win modelamiento de tres capas.



Al hacer el modelamiento de tres capas y asemejar lo más posible nuestra curva a una de las curvas patrón, se obtiene un error aceptable de 12,5%, como se puede observar en la figura 3.4 los datos obtenidos serían los siguientes:

Tabla 3.4 Datos de resistividad y espesor de las capas del terreno.

Resistividad de la capa (Ωm)	Espesor de la capa (m)
ρ_1 : 27,3 Ωm	E1: 2,84 m
ρ_2 : 13,2 Ωm	E2: 2,06 m
ρ_3 : 5251 Ωm	E3: ∞

3.3 Cálculo de la resistividad equivalente.

Para obtener la resistividad equivalente del terreno mediante el método de Burdoff - Yakobs se necesita definir el área estimada que ocupará la malla, así como también la profundidad a la que será enterrada. En este caso se estima que el ancho es de 4 metros y el largo de 6 metros, ocupado un área de 24 metros cuadrados a una profundidad de un metro bajo tierra.

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{ec. 3.1}$$

Para calcular r debemos obtener la raíz del área estimada de la malla dividido en pi.

$$r_0^2 = r^2 - h^2 \quad \text{ec. 3.2}$$

Para calcular r_0^2 debemos elevar al cuadrado r y eso restarlo a la profundidad de enterramiento la malla al cuadrado.

$$q_0^2 = 2 \times r \times (r + h) \quad \text{ec. 3.3}$$

Para calcular q_0^2 debemos multiplicar dos por r que sería el resultado de la ecuación 2.1 multiplicado por la suma entre r más la profundidad de enterramiento la malla.

$$u_i^2 = q_0^2 + r_0^2 + h_i^2 \quad \text{ec. 3.4}$$

Para calcular u_i^2 debemos sumar el resultado de la ecuación 3.3 más el resultado de la ecuación 3.2 más el espesor de la capa al cuadrado. El espesor se obtiene de las tablas 3.2 y 3.4.

$$v_i^2 = 0,5 \times \left(\sqrt{u_i^2 - 4 \times q_0^2 \times r_0^2} \right) \quad \text{ec. 3.5}$$

Para calcular v_i^2 debemos multiplicar 0,5 por la raíz del resultado de la ecuación 3.4 menos 4 por el resultado de la ecuación 3.3 por el resultado de la ecuación 3.2.

$$F_i = \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{r_0^2}} \quad \text{ec. 3.6}$$

Para calcular F_i debemos calcular la raíz de uno menos la división entre la ecuación 3.5 y el resultado de la ecuación 3.2.

$$\rho_{equiv} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\delta_i} \times (F_i - F_{i-1})} \text{ ec. 3.7}$$

Para calcular la resistividad equivalente se ocupó una hoja de cálculos de Excel.

Es necesario aclarar que i es el número de capa correspondiente.

3.3.1 Cálculo de la resistividad equivalente con datos obtenidos del método Wenner.

Tabla 3.5 Resultados de resistividad equivalente método Wenner.

r =	2,764	u₁² =	38,035	v₁² =	4,067	F₁ =	0,6225
r₀² =	6,639	u₂² =	46,083	v₂² =	3,223	F₂ =	0,7173
q₀² =	20,807	u₃² =	100000027,446	v₃² =	0,000	F₃ =	1,0000

La resistividad equivalente ocupando los datos obtenidos mediante el método Wenner es de 51.63 Ω m.

3.3.2 Cálculo de la resistividad equivalente con datos obtenidos del método Schlumberger.

Tabla 3.6 Resultados de resistividad equivalente método Schlumberger.

r =	2,764	u₁² =	35,512	v₁² =	4,447	F₁ =	0,5746
r₀² =	6,639	u₂² =	31,690	v₂² =	5,219	F₂ =	0,4626
q₀² =	20,807	u₃² =	100000027,446	v₃² =	0,000	F₃ =	1,0000

La resistividad equivalente ocupando los datos obtenidos mediante el método Schlumberger es de 78,98 Ω m.

CAPÍTULO IV

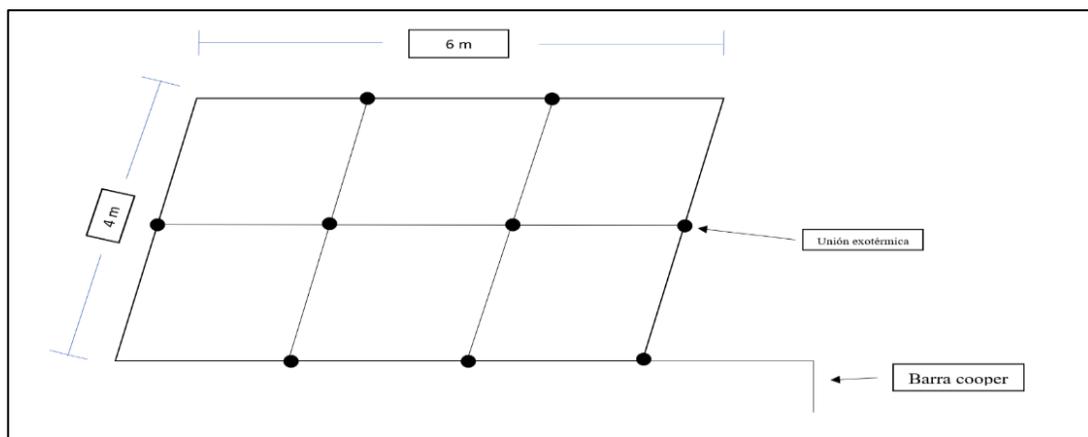
CÁLCULO DE RESISTENCIA GENERAL

En este capítulo se plantea el diseño de la malla a tierra y se calcula la resistencia general que tendrá esta.

4.1 Diseño de la malla a tierra M.T.

Para poder calcular la resistencia general debemos proponer una malla a tierra. Esta será de 6x4 m.

Figura 4.1 Diseño de malla a tierra.



4.2 Características de la malla.

- Largo: 4 [m]
- Ancho: 6 [m]
- Sección del conductor: 2 AWG.
- Área: 24 [m²].
- Perímetro: 20 [m]
- Largo total conductor: 36 [m]
- Profundidad de enterramiento: 1 [m].
- Separación de Conductores: 2 [m].

4.3 Materiales a utilizar.

En la elaboración de la malla a tierra se utilizará:

- 9 carga Exotérmica
- 24 m de cobre calibre 2 AWG (33,6 mm²)

- Molde XAC
- Molde TAC 9
- Ignitor Cadweld
- barra cooper 5/8

4.4 Resistencia malla puesta a tierra.

Para calcular la resistencia de la malla a tierra se ocupará la ecuación de Schwarz sugerida en la IEEE80, 2013 que determina la resistencia total de un sistema de puesta a tierra que consta de conductor y varillas. Todos los datos mencionados que se requieren para los cálculos de las siguientes ecuaciones se pueden visualizar en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Datos para calcular la resistencia general.

Ancho de la malla (a) =	4	Mts
Largo de la malla (b) =	6	Mts
Área que cubre la malla (A) =	24	mts2
líneas paralelas en ancho a =	4	
líneas paralelas en largo b =	3	
Largo del conductor (L1) =	34	Mts
Sección del conductor (d)=	33,6	mm2
Diámetro del conductor (d)=	0,0065	mts
Profundidad de la malla (h) =	1	mts
Número de electrodos (n) =	1	
Largo del electrodo (L2) =	1,5	mts
Diámetro de los electrodos (r) =	5/8	inch
Radio de los electrodos (r) =	0,00794	mts
Resistividad equivalente del terreno (ρ) =		ohm - mt

$$k_1 = 1,43 - \frac{2,3 \times h}{\sqrt{A}} - 0,044 \times \left(\frac{a}{b}\right) \quad \text{ec. 3.8}$$

Para poder calcular esta variable auxiliar h correspondería a la profundidad de enterramiento de la malla, A correspondería al área total que cubre la malla, a

correspondería a las líneas en paralelo del ancho de la malla y b correspondería a las líneas en paralelo del largo de la malla.

$$k_2 = 5,5 - \frac{8 \times h}{\sqrt{A}} + \left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{A}}\right) \times \frac{a}{b} \text{ ec. 3.9}$$

Para poder calcular esta variable auxiliar se ocupan los mismos datos que en la explicación de la ec. 3.8.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \times L_c} \times \left(\ln \left(\frac{2 \times L_c}{a'} \right) + k_1 \times \frac{L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right) \text{ ec. 3.10}$$

El resultado de la ecuación 3.10 corresponde a la resistencia del conductor y se necesita para calcular: ρ que corresponde a la resistividad equivalente del terreno obtenida en el capítulo tres, L_c que corresponde al largo del conductor obtenido del punto 4.1, a' que corresponde a la raíz del diámetro del conductor por la profundidad de enterramiento k_1 y k_2 obtenidos de las ecuaciones anteriores y por último A que corresponde al área total que cubre la malla.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi \times n_r \times L_r} \times \left(\ln \left(\frac{4 \times L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2 \times k_1 \times L_r}{\sqrt{A}} \times (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right) \text{ ec. 3.11}$$

El resultado de la ecuación 3.11 corresponde a la resistencia de los electrodos y se necesita para calcular: ρ que corresponde a la resistividad equivalente del terreno, n_r que corresponde al radio del electrodo L_r que corresponde al largo del electrodo, b que corresponde al radio del electrodo, k_1 que se obtiene de la ecuación 3.8, A que corresponde al área total de la malla y por último n_r que corresponde al número de electrodos que se utilizarán.

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \times L_c} \times \left(\ln \left(\frac{2 \times L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 \times L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right) \text{ ec. 3.12}$$

El resultado de la ecuación 3.12 corresponde a la resistencia mutua entre la resistencia del conductor y los electrodos y se necesita para calcular: L_r que corresponde al largo del electrodo, L_c que corresponde al largo del conductor, k_1 obtenido de la ecuación 3.8, K_2 obtenido de la ecuación 3.9 y A que corresponde al área de la malla.

$$R = \frac{R_1 \times R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \times R_m} \text{ ec. 3.13}$$

El resultado de la ecuación 3.13 corresponde a la resistencia del conjunto a tierra y se necesita para calcular: la resistencia de los electrodos, la resistencia del conductor y la resistencia mutua de estos.

4.4.1 Resistencia puesta a tierra método Wenner.

Para hacer los respectivos cálculos se utilizar una hoja de cálculo de Excel con el cual se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.2 Resultados de resistencia método Wenner.

K1=	0,931
k2=	3,745
R1=	4,904 Ω
R2=	30,830 Ω
Rm=	3,641 Ω
R=	4,8 Ω

Después de hacer los respectivos cálculos nos queda que la resistencia del conjunto de puesta a tierra es de 4,8 Ω . Esto significa que estaría dentro de norma ya que el decreto supremo N°8,2019 en el RIC N°6 nos indica que la resistencia de la puesta a tierra no debe exceder los 5 Ω .

4.4.2 Resistencia puesta a tierra Método Schlumberger.

Tabla 4.3 Resultados de resistencia método Schlumberger.

K1=	0,931
k2=	3,745
R1=	7,501 Ω
R2=	47,160 Ω
Rm=	5,569 Ω
R=	7,4 Ω

Después de hacer los respectivos cálculos nos queda que la resistencia del conjunto de puesta a tierra es de 7,4 Ω . Esto significa que no estaría dentro de norma ya que el decreto

supremo N°8,2019 en el RIC N°6 nos indica que la resistencia de la puesta a tierra no debe exceder los 5 Ω .

4.5 Resistencia de la malla aplicando el método de caída de potencial.

En el terreno donde se proyecta la puesta a tierra se hizo una instalación de una malla de tres metros de ancho por tres metros de largo. Según cálculos teóricos la resistencia general utilizando los datos obtenidos mediante el método Wenner es de 5,5 Ω , pero al instalar la malla y medir la resistencia mediante el método de caída de potencial se obtuvo que la resistencia real es de 4,07 ohm, esto quiere decir que la resistencia verdadera comparada con la teórica tiene una diferencia de un 26%. Así que si comparamos la resistencia general obtenida de la tabla 4.2 y sacamos el 26% y lo restamos a la resistencia general se obtiene que al instalar la malla de la figura 4.1 la resistencia sería de 3,55 Ω .

4.6 Análisis de resultados.

Se puede observar que haciendo los cálculos de resistencia general mediante ambos métodos solo uno cumpliría la norma y ese sería utilizando los datos obtenidos del modelamiento del campo mediante el método Wenner. Esto lleva que al analizar los resultados teniendo en cuenta el método de caída de potencial se puede decir que los valores del modelamiento del campo obtenido mediante los valores utilizando el método Wenner sería el más adecuado, ya que la resistencia general que nos da de este se acerca mucho más a la realidad simulando la instalación de la malla.

CAPÍTULO V

CONCLUSIÓN

Al analizar las mediciones realizadas mediante ambos métodos se pudo observar que los valores obtenidos son bastante parecidos, pero a la hora de realizar el modelamiento del campo mediante el software IPI2win, la resistividad de las capas si bien no son muy diferentes si varían, pero en cambio en el espesor de estas si se nota una gran diferencia. Esto conlleva a que al calcular la resistividad aparente utilizando los datos obtenidos del modelamiento del terreno utilizando los valores entregados mediante la medición con el método Wenner es más baja que los resultados que da al ser utilizado el método Schlumberger y esto provoca que al calcular la resistencia del conjunto de puesta a tierra con el método Wenner sea más baja que si se utilizan los datos obtenidos mediante el método Schlumberger. También se concluyó que al medir la resistividad del terreno físicamente, el método Schlumberger es más fácil y rápido de realizar debido a que al mantenerse dos electrodos fijos no necesitas moverte tanto. Finalmente se pudo concluir que la resistencia del conjunto de puesta a tierra calculada a través de los datos obtenidos utilizando el método Wenner es la más parecida a la realidad y con esto se puede inferir que para realizar la malla a tierra es mejor medir la resistividad aparente del terreno con este método ya que se obtienen valores más cercanos a la realidad, además se pudo concluir que mientras menor sea la resistividad equivalente del terreno menor será la resistencia de puesta a tierra y mientras mayor sea la resistividad mayor será la resistencia de puesta a tierra. Si bien el diseño cumple con la normativa chilena ya que la resistencia da un valor de $3,55 \Omega$, si se quiere obtener una resistencia que sea más baja se necesitaría la instalación de una malla de mayor tamaño o también si se quiere obtener un valor de resistencia más baja manteniendo la malla propuesta sería recomendable hacer un mejoramiento del suelo utilizando geo gel que como se menciona en el punto 2.15.1 para resistividades bajas, puede reducir en un 40% la resistencia de la puesta a tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Gabarda, L. P. (1993). NTP 400: Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano. Ministerio de Trabajo Y Asuntos Sociales de España, 9. Recuperado el 25/11/2022 <https://saludlaboralydiscapacidad.org/wpcontent/uploads/2019/04/NTP-400.pdf>
- IEEE Std 80 -2013 (Guide for Safety of AC Substation Grounding” Recuperado el 25/11/2022 <https://pdfcoffee.com/ieee-std80-2013spanishpartial1pdf-3-pdf-free.html>.
- IEEE IEEE-81 2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System Recuperado el 25/11/2022 <http://bentoros.com/wp-content/uploads/2019/07/IEEE-81.pdf>.
- PROCOBRE (2013) SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA recuperado el 25/11/2022 <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-callao/proyecto-de-sistemas/08-sistema-de-puesta-a-tierra-procobre/21835815>
- Ministerio de Energía (2019). Aprueba reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica. Pliegos Técnicos consignados en el DS N°8/2019. Recuperado de: Diario Oficial de la República de Chile, 25 de noviembre 2022 disponible en el siguiente link: <https://sec.cl/sitio-web/descargar/469/decreto-08/27652/decreto8.pdf>
- Resistividad, teoría y diseño de sistemas de puesta a tierra. Roberto Ruelas (s.f.). Recuperado el 25/11/2022 <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>.
- Walter M. Villa-Acevedo. (28 de Junio de 2018). Estimación de Parámetros del Suelo de dos Capas usando el Algoritmo de Optimización de Mapeo Media-Varianza. La Serena - Chile. Monseñor Subercaseaux 667 Recuperado el 25/11/2022 de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000100299#:~:text=El%20método%20de%20Wenner%20es,b%20es%20la%20profundidad%20de.
- Vallejos, Diego. (2007). Diseño, construcción y montaje de una cámara de transformación de 500 KVA para la planta industria Govaira. Recuperado el 25/11/2022

https://www.researchgate.net/publication/279670757_Disen%C3%B3_construcci%C3%B3n_y_montaje_de_una_camara_de_transformaci%C3%B3n_de_500_KVA_para_la_planta_industri%20Govaira.

REJYRA, 2019, Ficha t\u00e9cnica mejorador conductivo, versi\u00f3n 2, recuperado el 20/12/2022
<http://rejyra.com/wp-content/uploads/2017/11/FICHA-T\u00c9CNICA-REDUCRETE.pdf>

GEO SINTER LTDA, Ficha T\u00e9cnica geo gel 8+, Arica, recuperado el 20/12/2022
<https://www.bibguru.com/es/g/cita-apa-informe/>

Anexo N°1

Mediciones de terreno método Wenner



Mediciones de terreno método Wenner



Anexo N°2

Mediciones de terreno método Schlumberger



Mediciones de terreno método Schlumberger



Anexo N°3

Método de caída de potencial

