



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN
GENERADORAS FOTOVOLTAICAS CONECTADAS A LA RED DE
DISTRIBUCIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

MAURICIO IGNACIO CARRASCO ZAHN

PROFESOR GUÍA:
Nelson Morales Osorio

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Augusto Lucero Alday
Sergio Díaz Caro

SANTIAGO DE CHILE
2023

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN GENERADORAS FOTOVOLTAICAS CONECTADAS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN

La idea de esta memoria es proponer una metodología sencilla y rápida de diseño de sistemas de puesta a tierra para generadores fotovoltaicos conectados a la red de distribución. Esto con el fin de ayudar a las empresas que se dedican a diseñar e instalar dichas generadoras fotovoltaicas, quienes no diseñan el sistema de puesta a tierra de las mismas, ya sea por desconocimiento o porque suponen que una instalación sencilla bastará para quedar dentro de la norma, lo cual no es siempre el caso. La metodología busca ser sencilla para no sobrecargar a las empresas con este diseño, sino pedirles que hagan un poco más de lo que actualmente hacen.

Para lograr desarrollar dicha metodología, se ha recopilado información de fuentes tanto nacionales como internacionales referentes al tema de puesta a tierra. Dicha información se ha articulado de tal manera que se ha producido una metodología secuencial de 7 pasos los cuales permiten, de ser seguidos, obtener un diseño normado de puesta a tierra.

La metodología propuesta fue comprobada en un estudio en terreno y se ha comprobado que los resultados teóricos obtenidos se asemejan a la realidad con errores relativos no superiores al 7.1 %. Dicho error es esperable y aceptable al tener en cuenta que, para mantener la metodología sencilla, se han utilizado métodos aproximados en los cálculos.

Actualmente, la metodología ha sido comprobada en un solo estudio en terreno y, por ende, puede estar sesgada y limitada. Sin embargo, es necesario destacar que las fórmulas utilizadas y métodos provienen de fuentes confiables como la normativa chilena o la IEEE.

Agradecimientos

Tanto el proceso universitario como el término de la carrera no han sido fáciles. Pero, a pesar de las dificultades y los desafíos en el camino, ha habido personas que me han apoyado y animado a seguir adelante. Creo que es justo ocupar este espacio para agradecerles. A ti, que estás leyendo esto, tu apoyo durante estos 7 años ha sido crucial para llegar a este día y, aunque no te nombre directamente, tienes un espacio en mi corazón.

Quiero partir agradeciendo a mi familia, que ha estado pendiente de mi proceso y me ha apoyado para seguir adelante. Especialmente, quiero agradecer a mi mamá, mi papá y mis hermanas, quienes continuamente se preocupan por mí y me instan a seguir adelante. Adicionalmente, quiero agradecer mis abuelos, quienes siempre me han apoyado. Lamentablemente, mi abuela no alcanzó a ver este día, pero ella sabía que podía llegar acá.

Quiero agradecer a mi pareja, María-José, quien siempre ha estado a mi lado, viendo mis avances, presionándome y empujándome a lograr mis metas y objetivos. Además, agradezco a su vasta familia, quienes siempre han estado pendientes y preguntando por mis avances.

Quiero agradecer a mi familia scout. Son el factor que sábado a sábado me sacan de la rutina semanal y me dan ánimo y felicidad. Especialmente, quiero agradecer a Cathy y a Isi, quienes desde hace más de un año llegaron a cambiar mi vida y permitirme ser siempre mejor.

Quiero agradecer a mis amigos que siempre me sacan una sonrisa, un tema de conversación ameno o simplemente un tiempo de calidad. Particularmente, me gustaría destacar la compañía de Sofía y Andrés, quienes siempre están ahí para mí.

Quiero agradecer a mis grupos de amigos de videojuegos, quienes noche a noche me dan un espacio para disfrutar, reír y despejarme de los días agotadores.

Quiero agradecer a mis compañeros y amigos de universidad, quienes han experimentado conmigo el proceso universitario y me han ayudado y apoyado en las diversas materias y actividades. Agradezco especialmente haberme topado con Alfred, Nicolás, Ignacio, Bárbara y Luis en esta travesía.

Finalmente, quiero agradecer a mi profesor guía, el señor Nelson Morales, quien me dio su apoyo en este tema desde hace ya más de un año y quien ha sido un agente activo en el desarrollo de mi memoria. Evidentemente, sin él, no hubiera podido completarla.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
2. Antecedentes de Estudio	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Definiciones frecuentes	3
Sistema puesta a tierra	3
Voltaje de contacto	3
Voltaje de paso	4
Electrodo de puesta a tierra	4
2.1.2. Seguridad de las personas	5
2.1.3. Factores que afectan al diseño de puesta a tierra	8
2.1.3.1. Instalación eléctrica a proteger	8
2.1.3.2. Resistividad del terreno	9
2.1.4. Cálculo de resistencia de puesta a tierra	11
2.1.4.1. Barra enterrada verticalmente	12
2.1.4.2. Dos barras enterradas verticalmente	12
2.1.4.3. Varias barras enterradas verticalmente	12
2.1.4.4. Barra enterrada horizontalmente	13
2.1.4.5. Anillo conductor enterrado horizontalmente	13
2.1.5. Cálculo voltaje de paso y contacto	13
2.2. Estado del arte	14
2.2.1. Diseño eficiente de malla de tierra en parques fotovoltaicos de grandes dimensiones - Nicolás Eduardo Sepúlveda Hermosilla - 2021 [9]	14
2.2.2. Software para la determinación de configuración geoelectrica y análisis de mallas de tierra en terrenos estratificados - Francisco Javier Sweet Stein - 2015 [10]	15
3. Metodología	16
3.1. Medición de la resistividad en el terreno	16
3.1.1. Método de Wenner	16
3.1.2. Método de Schlumberger	18
3.2. Recopilar datos del sistema eléctrico solar	19
3.3. Establecer resistencia de puesta a tierra límite	20

3.4.	Obtener número de estratos del terreno y resistividades aparentes de estos	22
3.5.	Definir geometría de la malla a tierra	25
3.6.	Calcular resistividad equivalente del terreno	26
3.7.	Calcular y comparar la resistencia de puesta a tierra	27
3.8.	Voltaje de paso y de contacto	28
3.9.	Resumen	28
4.	Implementación	30
4.1.	Generalidades	30
4.2.	Medición de la resistividad en el terreno	30
4.3.	Recopilación de datos del sistema solar	32
4.4.	Establecimiento de resistencia de puesta a tierra límite	32
4.5.	Obtención del número de estratos del terreno y resistividades aparentes de estos	33
4.6.	Definición de la geometría de la malla a tierra	33
4.7.	Cálculo de la resistividad equivalente del terreno	34
4.8.	Cálculo y comparación de la resistencia de puesta a tierra	34
4.9.	Comparación empírica	35
5.	Análisis y discusión	38
6.	Conclusiones	45
	Bibliografía	47
	Anexos	48
A.	Medición de resistencia de puesta a tierra	48
A.1.	Método clásico de medición de tres electrodos	48
A.2.	Variación del método clásico de medición de tres electrodos	49

Índice de Tablas

2.1.	Determinación de la tensión de seguridad según el tipo de lugar y tipo de corriente.	9
2.2.	Factor F de acuerdo a la cantidad de electrodos verticales usados.	13
3.1.	Tabla de datos para el método de Wenner.	18
3.2.	Tabla de datos para el método de Schlumberger.	19
4.1.	Datos obtenidos en terreno mediante método de Wenner.	31
4.2.	Parámetros del supuesto sistema solar distribuido a proteger.	32
4.3.	Resistencias límites a considerar.	33
4.4.	Parámetros del terreno de dos estratos.	33
4.5.	Parámetros del terreno de tres estratos.	33
4.6.	Datos de los electrodos utilizados durante la implementación.	34
4.7.	Resistividad del terreno equivalente de un estrato.	34
4.8.	Resistencias calculadas para las configuraciones escogidas.	34
4.9.	Datos relevantes para medición clásica de resistencia con electrodo de corriente separado 4 metros. Malla de un electrodo.	36
4.10.	Datos relevantes para medición clásica de resistencia con electrodo de corriente separado 8 metros. Malla de un electrodo.	36
4.11.	Datos relevantes para medición con variación de resistencia con electrodo de corriente separado 4 metros. Malla de un electrodo.	36
4.12.	Datos relevantes para medición con variación de resistencia con electrodo de corriente separado 8 metros. Malla de cuatro electrodos.	37
5.1.	Tabla resumen del análisis entre valores reales y teóricos de la implementación.	39
5.2.	Resumen de posibles soluciones al terreno utilizado.	43

Índice de Ilustraciones

2.1.	Representación de voltaje de contacto.	4
2.2.	Representación de voltaje de paso.	4
2.3.	Circuitos equivalentes de Thevenin. Voltaje de contacto y voltaje de paso. . . .	6
3.1.	Disposición de electrodos en método de Wenner.	17
3.2.	Disposición de electrodos en método de Schlumberger.	19
3.3.	Ventana inicial de IPI2WIN.	23
3.4.	Ventana de ingreso de datos de IPI2WIN.	23
3.5.	Ventana de resultados de IPI2WIN.	24
4.1.	Resistividad calculada en función del espaciamiento entre electrodos.	32
4.2.	Comparación entre resistencias a tierra calculada y límites establecidos.	35
A.1.	Movimiento del electrodo de potencial para el método clásico de medición. . .	49
A.2.	Movimiento del electrodo de potencial para el método variado de medición. . .	50

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Chile es un agente activo en la lucha contra el cambio climático. El país ha reconocido la importancia de cerrar centrales de generación eléctrica con un alto impacto de contaminación y al mismo tiempo reemplazarlas por centrales de energía renovable, que permiten generar energía eléctrica de manera más limpia. Los objetivos de la nación en materia de cambio climático incluyen convertirse en un país con, al menos, 70 % de generación eléctrica renovable al año 2050 y de al menos 60 % para el año 2035. [1]

Actualmente existen varias estrategias en curso que permiten a la ciudadanía participar de este cambio histórico en la matriz energética de Chile y ayudar en la lucha contra el cambio climático. Una de estas opciones disponibles para los habitantes del país es la ley de generación distribuida (ley 20.571 [2]) promulgada el año 2012 que permite la auto generación de energía eléctrica mediante energías renovables no convencionales (siendo la energía fotovoltaica la más común). Además, la ley de generación distribuida permite también conectar estos métodos de generación renovables a la red de distribución local y vender los excedentes de energía.

Generalmente para poder hacer uso de los beneficios de la ley 20.571 los interesados deben acercarse a una empresa experta en el tema, la cual ayudará en el diseño del sistema generador, instalará el proyecto y realizará los trámites necesarios frente a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y la empresa de distribución eléctrica local, guiándose por la normativa general de instalaciones eléctricas y por la normativa específica para estas generadoras conectadas a la red de distribución.

Aunque en el momento culminante de estas instalaciones todas sus partes y componentes se encuentran dentro de los límites establecidos, se ha identificado en varias ocasiones la necesidad de subsanar aspectos técnicos fuera de norma durante el proceso de tramitación o instalación. En varios casos estas deficiencias suelen ser originadas debido a un diseño pobre o nulo por parte de la empresa que presta el servicio. Un caso común de esta situación es el sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra se encuentran en todas las instalaciones eléctricas y corresponden a un mecanismo de protección adicional para personas y equipos frente a condiciones

anormales de operación. En instalaciones eléctricas de gran potencia, la puesta a tierra debe ser grande y compuesta por varios elementos conductores que requieren de un proceso de diseño con el fin de poder dispersar de manera segura la corriente de falla en el terreno. En cambio, ocurre lo contrario en instalaciones eléctricas de baja potencia, donde el sistema de puesta a tierra generalmente es simple debido a que las corrientes a dispersar son reducidas. Esto último provoca que empresas relacionadas con instalaciones eléctricas de baja potencia no diseñen sus sistemas de puesta a tierra y realicen una instalación típica de estos, como un electrodo enterrado verticalmente, en la gran mayoría de instalaciones, lo que en algunos casos provoca instalaciones fuera de norma debido a las características del terreno.

Empresas dedicadas a la generación distribuida, han identificado este mismo problema en sus operaciones, encontrándose con problemas espontáneos frente a la SEC por tener puestas a tierra fuera de norma producto de la no realización del diseño. Esto le provoca retrasos en su cronograma al tener que realizar arreglos en la instalación y le provoca una pérdida de imagen frente al cliente por el mismo motivo, además de una pérdida de beneficios al cliente por el retraso.

Por ello, se busca afrontar el problema, brindando las herramientas necesarias a estas empresas y permitiéndoles ser capaces de diseñar sistemas de puesta a tierra en norma ante cualquier terreno e instalación necesitada. Para lograr este cometido, se busca generar una metodología de diseño de sistemas de puesta a tierra en generadoras fotovoltaicas distribuidas, con el fin de solventar estas dificultades de las empresas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Proponer una metodología para el diseño de puesta a tierra en sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución.

1.2.2. Objetivos específicos

- Presentar los métodos de puesta a tierra, buenas prácticas, normas, fórmulas relacionadas, reglamentos y/o recomendaciones a nivel nacional e internacional.
- Elaborar una metodología de diseño y habilitar o compatibilizar software necesario para su aplicación.
- Validar metodología mediante casos de estudio en terreno.

Capítulo 2

Antecedentes de Estudio

2.1. Marco teórico

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una puesta a tierra como “Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra” [3]. Esta definición presentada permite tener una noción general sobre una puesta a tierra, pero no es esclarecedora sobre los objetivos o importancia de esta misma. Lo anterior se debe a que dependiendo del país e instalación eléctrica donde se esté trabajando, la finalidad y obligatoriedad de los sistemas puesta a tierra varía.

A continuación, se pretende ahondar más en los conceptos relevantes de una puesta a tierra, que tienen que ver con sus objetivos y el cómo diseñarlas.

2.1.1. Definiciones frecuentes

Sistema puesta a tierra

Es el conjunto de todos los elementos, conexiones eléctricas y dispositivos que forman parte de una puesta a tierra. En su totalidad permiten formar una base de potencial común de conexión a tierra para partes metálicas o dispositivos eléctricos.

Voltaje de contacto

Corresponde a la diferencia de tensión eléctrica existente entre una superficie en donde una persona está parada y una estructura conductora conectada a tierra, mientras dicha persona está en contacto a la estructura por su mano y circula una corriente por el terreno. Una ejemplificación gráfica se muestra en la figura 2.1 donde V_{AB} corresponde al voltaje de contacto.

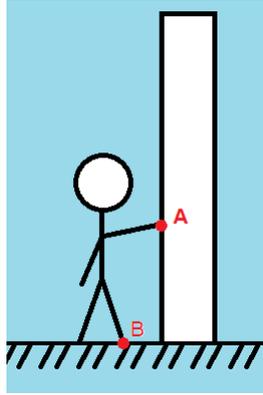


Figura 2.1: Representación de voltaje de contacto.

Voltaje de paso

Se le llama así a la diferencia de tensión eléctrica que podría experimentar una persona entre sus pies cuando estos están separados 1 metro y circula una corriente por el terreno, mientras que el sujeto no está en contacto con otra superficie conectada a tierra. Una ejemplificación gráfica se muestra en la figura 2.2 donde V_{AB} corresponde al voltaje de paso.

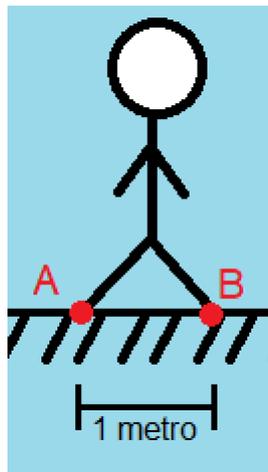


Figura 2.2: Representación de voltaje de paso.

Electrodo de puesta a tierra

Un electrodo de puesta a tierra, también conocido como “pica de tierra” o “electrodo de tierra”, es un componente en los sistemas eléctricos que se utiliza para proporcionar una conexión segura y confiable entre un sistema y la tierra. Su función principal es proteger a las personas, equipos y estructuras de daños causados por corrientes eléctricas no deseadas, como las resultantes de descargas atmosféricas o fallas en el sistema.

El electrodo de puesta a tierra generalmente consiste en un conductor metálico, como una barra o una varilla de cobre o acero galvanizado, que se instala en el suelo y se conecta a la infraestructura eléctrica o electrónica. Para que el sistema de puesta a tierra sea efectivo, el

electrodo debe estar bien enterrado en el suelo, ya que la tierra actúa como un conductor y dispersa la corriente eléctrica de manera segura.

2.1.2. Seguridad de las personas

Varios objetivos que persiguen los sistemas puesta a tierra tienen que ver con la seguridad de las personas alrededor de la instalación eléctrica. Esta memoria de título hará especial énfasis en dicho fin debido a que en gran parte esta normada por el pliego técnico normativo RIC N°06 [4], que da un enfoque particular en la seguridad humana en su definición de puesta a tierra.

Al momento de diseñar sistemas de puesta a tierra con el fin de proteger a las personas hay dos situaciones que se pretenden mantener en valores seguros: el voltaje de contacto y el voltaje de paso. Esto debido a que el paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano afecta a funciones vitales, como la respiración o la circulación sanguínea. Los valores perjudiciales de corriente eléctrica para el humano han sido objeto de estudio y se ha encontrado un problema complejo, pues esto depende de una serie de factores como el sexo del sujeto, su edad, la frecuencia de la corriente eléctrica, el tiempo de exposición, entre otros.

Basados en algunos estudios la SEC propone en su pliego técnico normativo RIC N°06 [4] los siguientes voltajes de paso y contacto tolerables límites para cuerpos de 50 kg (caso conservador):

$$V_p = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.1)$$

$$V_c = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.2)$$

Calculando el factor C_s como:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 * H_s + 0.09} \quad (2.3)$$

En donde:

- V_p = Voltaje de paso límite tolerable [V].
- V_c = Voltaje de contacto límite tolerable [V].
- ρ = Resistividad de la tierra por debajo de material superficial [Ωm].
- ρ_s = Resistividad de la superficie del terreno en [Ωm].
- t = Duración de la corriente de falla a la tierra en segundos. Realizando el cálculo con un valor menor o igual al tiempo de operación de la protección de respaldo en [s].
- H_s = Espesor del material de la superficie en [m].
- C_s = Factor de corrección para calcular resistencia efectiva en la presencia de un espesor finito de material de la superficie.

Las fórmulas 2.1 y 2.2 nacen, en parte, de la investigación de Dalziel y Lee [5] en animales de peso similar al humano. Su investigación logra determinar una corriente límite tolerable que no produce fibrilación ventricular en el 99.5% de los casos y que depende de factores como el tiempo de exposición y el peso del sujeto. Así, esta corriente límite tolerable sigue la siguiente ecuación.

$$I_{fv} = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (2.4)$$

En donde la variable K corresponde a una constante empírica que se relaciona con la cantidad de energía que los sujetos absorben ante el paso de corriente por el cuerpo. Este valor K corresponde a 0,116 en personas de peso 50 Kg y a 0.157 en personas de 70 Kg.

El siguiente paso para llegar a las ecuaciones 2.1 y 2.2 es identificar el voltaje de paso y de contacto límite que ocasionan la corriente límite tolerable estudiada en la fórmula 2.4. Para ello, se ocupará el circuito equivalente de Thevenin para ambas situaciones como se plantea en la figura 2.3.

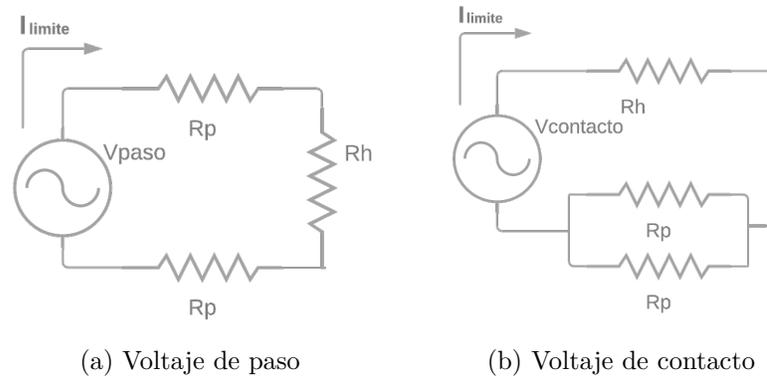


Figura 2.3: Circuitos equivalentes de Thevenin. Voltaje de contacto y voltaje de paso.

En donde:

- V_{paso} = Voltaje de paso límite tolerable.
- $V_{contacto}$ = Voltaje de contacto límite tolerable.
- R_p = Resistencia entre el pie y el terreno.
- R_h = Resistencia del cuerpo humano.
- R_g = Resistencia de puesta a tierra

En base a los circuitos equivalentes de Thevenin mostrados en la figura 2.3 el voltaje límite tolerable en ambos casos responde a las siguientes ecuaciones:

$$V_{paso} = I_{límite} * (2 * R_p + R_h) \quad (2.5)$$

$$V_{contacto} = I_{límite} * (R_h + \frac{R_p}{2}) \quad (2.6)$$

Finalmente, para recuperar las ecuaciones 2.1 y 2.2 hay que definir dos de las resistencias utilizadas en las ecuaciones 2.5 y 2.6: La resistencia del cuerpo humano y la resistencia entre el pie y el terreno. Notar que para estos cálculos la resistencia de contacto manual se considera nula.

La resistencia del cuerpo humano es un tanto difícil de determinar, esto ya que hay varios factores involucrados en su cálculo. Primero hay que señalar que el cuerpo humano responde como impedancia eléctrica ante el paso de la corriente, es decir, hay un efecto tanto resistivo como capacitivo, sin embargo, este comportamiento depende en gran parte de la frecuencia de la corriente eléctrica. A frecuencias industriales (50 a 60 hz) solamente influye el efecto resistivo, mientras que el efecto capacitivo empieza a tomar importancia en frecuencias del orden de 1 kHz.

Segundo, este valor resistivo a frecuencias industriales también va a depender de la temperatura y humedad del sujeto, así como del área de contacto, la presión ejercida y sus características fisiológicas. La investigación de Dalziel [5] estima que este valor resistivo a frecuencias industriales va desde los 500 $[\Omega]$ hasta los 1.500 $[\Omega]$. Aun así, a pesar de este rango acotado de posibles valores es inseguro no trabajar con un valor concreto general para todos los casos, por lo mismo y debido a que no todas las condiciones desfavorables (y favorables) ocurrirán al mismo tiempo, el estándar IEEE 80-2013 [3] propone un valor de 1.000 $[\Omega]$ para la resistencia humana. Entonces:

$$R_h = 1.000 \text{ } [\Omega] \quad (2.7)$$

La resistencia de contacto entre el pie y el terreno es calculada mediante la resistividad equivalente del terreno e incorpora un factor de corrección C_s para cuando existe una capa fina superficial de alta resistividad ρ_s y espesor H_s . El factor C_s es calculado mediante la ecuación 2.3 ya vista y la resistencia de contacto es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$R_p = 3 * \rho_s * C_s \text{ } [\Omega] \quad (2.8)$$

Si se reemplaza en las ecuaciones 2.5 y 2.6 los valores encontrados en 2.4, 2.7 y 2.8 se rescatan las ecuaciones 2.1 y 2.2 correspondientes a los voltajes límites permisibles de paso y contacto aceptados por la SEC.

Cabe destacar que la misma SEC, en su pliego técnico normativo RIC 05, específicamente el punto 5.8 [6], señala que las tensiones máximas a las cuales puede quedar sometido el cuerpo humano son de 50 V en corriente alterna y 120 V en corriente continua en lugares secos, mientras que para lugares húmedos estos valores decrecen a 24 V en corriente alterna y 60 V en corriente continua.

2.1.3. Factores que afectan al diseño de puesta a tierra

La necesidad de diseñar un sistema de puesta a tierra en cada instalación eléctrica se debe a que existen ciertos factores que determinaran en cierta forma la geometría de la malla de tierra, la resistencia de puesta a tierra deseada o el grosor del conductor de tierra a ocupar entre otras cosas.

Una parte importante de estos factores son difíciles de modificar lo que puede ocasionar que dos instalaciones eléctricas similares deban tener un sistema de puesta a tierra distinto. A continuación, se nombrarán y explicarán los factores más relevantes a la hora de diseñar un sistema de puesta a tierra.

2.1.3.1. Instalación eléctrica a proteger

Ya se ha hablado anteriormente que el sistema de puesta a tierra está pensado como un elemento de protección a las personas que interactúan con un determinado sistema eléctrico. Existen ciertas características de dicha instalación eléctrica que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de puesta a tierra.

Una característica poco relevante para esta memoria es la frecuencia a la cual opera la instalación eléctrica. Como ya se ha mencionado la impedancia del cuerpo humano ante el paso de energía eléctrica a frecuencias bajas, como las industriales (50 a 60 Hz), es de carácter resistivo mientras que a frecuencias mayores (sobre 1 kHz) existe un efecto capacitivo notable en el cuerpo humano que puede modificar las expresiones de voltaje de paso y contacto anteriormente señaladas por la SEC. Como este escrito se centra en instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red de distribución chilena, se entiende que la frecuencia utilizada será de 50 Hz en toda ocasión, por lo que esta propiedad de la instalación tiene poca influencia.

Otra cualidad ya más importante de la instalación eléctrica es la corriente de falla de esta y por consiguiente la corriente residual que el sistema de puesta a tierra dispersará. En una condición de falla a tierra del sistema eléctrico se originarán corrientes de falla que en general no son equilibradas y por ende no se anulan provocando una corriente residual que circulará por el terreno, provocando diferencias de potencial peligrosas en este. Estas diferencias de potencial son las que originan los ya mencionados voltajes de paso y contacto y por ende existe una relación estrecha entre la corriente de falla y estos voltajes. Esta característica de la instalación eléctrica puede traer dificultades a la hora del diseño del sistema puesta a tierra ya que, aunque se consigan resistencias a tierra dentro de la norma puede que los voltajes de paso y contacto ocasionados por las corrientes de fallo sean inseguros, teniendo que modificar la geometría de la malla para reducirlos a valores seguros.

Finalmente, otra característica crucial de la instalación eléctrica son sus dispositivos de seguridad, principalmente el interruptor magnetotérmico general del circuito o equipo protegido por la puesta a tierra. Esto ya que la normativa señala que la resistencia de puesta a tierra tiene que ser inferior al valor obtenido por la siguiente ecuación: [6]

$$R_{tp} = \frac{V_s}{I_0} \quad (2.9)$$

En donde:

- V_s es la tensión de seguridad dada por la tabla 2.1.
- I_0 es la corriente de operación de la protección del circuito o equipo protegido por la puesta a tierra.

Tabla 2.1: Determinación de la tensión de seguridad según el tipo de lugar y tipo de corriente.

V_s [V]	Condición
50	Lugar seco, corriente alterna
120	Lugar seco, corriente continua
24	Lugar húmedo, corriente alterna
60	Lugar húmedo, corriente continua

2.1.3.2. Resistividad del terreno

La resistividad del terreno (ρ) es un factor crucial al momento de diseñar sistemas de puesta a tierra, esto ya que como ya se ha visto, la resistividad del terreno influye en los voltajes de paso y contacto límite que las personas presentes en el terreno pueden soportar. Además, este valor definirá la resistencia de la puesta a tierra y los voltajes de paso y contacto a los cuales se someterán las personas en el terreno, como se verá más adelante.

La resistividad es un valor que dicta el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica y se mide en ohm-metro (Ω m). Materiales con baja resistividad pueden ser catalogados como conductores mientras que aquellos con alta resistividad son catalogados como aislantes.

En la realidad, los terrenos son espacios complejos producto de cambios geológicos extensos de largo plazo y cambios de corto plazo producto de lluvias u otros fenómenos. Lo anterior provoca que dos terrenos que a simple vista parecieren iguales posean diferentes resistividades debido a la serie de materiales y formas que lo componen, provocando la necesidad de indagar más a fondo sobre estos para un diseño correcto de los sistema de puesta a tierra.

En su mayoría los terrenos están compuestos por diversidad de materiales lo que provoca que la resistividad de este sea heterogénea. No obstante, estas formaciones suelen presentarse en forma de estratos o capas aproximadamente paralelas al piso con resistividades casi homogéneas.

Lo anterior permite que, en la práctica, los terrenos puedan ser modelados por estratos paralelos a la superficie con resistividad homogénea. Cada uno de estos estratos son modelados y caracterizados por un valor de resistividad y su espesor, considerando el último estrato con un espesor infinito.

La necesidad de conocer las características de los distintos estratos para el diseño de una puesta a tierra conduce a la necesidad de un método de inspección del terreno. Algunos métodos usados no invasivos consisten en la utilización de electrodos enterrados en el terreno, algunos de estos se ocupan para inyectar corriente por el terreno y otros para medir la diferencia de potencial inducida por la corriente inyectada. Relacionando la corriente inyectada y el voltaje medido es posible obtener la resistencia entre los puntos de medición y, relacionando la resistencia y la distancia de medición, es posible obtener la resistividad del terreno.

Dos métodos que ocupan este sistema de electrodos son el método de Schlumberger y el método de Wenner. Ambos métodos se caracterizan por utilizar cuatro electrodos en una misma línea, dos de los cuales se ocupan para inyectar corriente en el terreno y los otros dos para medir el potencial inducido, además, ambos métodos permiten variar la distancia entre los electrodos para ejecutar diferentes mediciones y así evaluar diversas partes del terreno. Los métodos se diferencian en cómo son separados los electrodos al momento de variar la distancia entre ellos, ya que mientras el método de Schulmberger mantiene los electrodos de potencial fijos, el método de Wenner varía los cuatro electrodos entre medición y medición. Estos métodos descritos serán detallados más adelante en esta memoria.

Los métodos señalados anteriormente permiten determinar rápidamente la resistividad de un terreno homogéneo o de una sola capa, ya que la resistividad calculada se mantiene prácticamente constante al ir variando la disposición de los electrodos. Los terrenos de dos o más capas representan una dificultad adicional ya que al ir variando la disposición de los electrodos la resistividad calculada varía igualmente. Esto se debe a que la corriente inyectada penetra más profundo mientras más separados estén los electrodos de corriente alcanzando capas más profundas que varían la resistencia total que la corriente enfrenta y sea finalmente una combinación de resistividades de las distintas capas. Esto también provoca que las resistividades calculadas no sean representativas de una sola capa sino de una mezcla de estas.

Para poder determinar de manera adecuada la cantidad de capas del terreno, las resistividades de estas y su espesor, es posible comparar visualmente las curvas de resistividad y distancia de medición con las curvas modelos generadas por Orellana y Mooney. Alternativas más actuales incluyen el uso de software especializado que entrega los datos buscados pero que, al igual que las curvas modelos señaladas anteriormente, se basan en comparar los gráficos obtenidos en terreno con gráficos anteriormente generados.

Si bien los terrenos pueden tener varias capas con resistividades bien variantes entre sí en la práctica se suele trabajar con un terreno equivalente de dos capas, una superior con resistividad $[\rho_1]$ y espesor $[h_1]$ definidas y una capa inferior con resistividad $[\rho_2]$ definida y espesor infinito. Aunque también y por simplicidad de algunas configuraciones es posible trabajar con terrenos equivalentes de una sola capa la cual solo se caracteriza por su resistividad $[\rho]$.

Uno de los métodos usados para lograr esta reducción de terrenos de varias capas a uno de dos capas o una es el propuesto por Yakobs [7]. Este método permite elegir el número de capas consecutivas que se agruparan, aconsejando transformar las capas en directo contacto con la malla en una sola y agrupar las inferiores en otra o en la misma.

El método de Yakobs propone que para un terreno de n capas es posible agrupar las

k capas superiores en una sola con una resistividad equivalente calculada por la siguiente expresión:

$$\rho_{eq[1,2,\dots,k]} = \frac{F_k}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\rho_i} (F_i - F_{i-1})} \quad (2.10)$$

En donde:

$$F_i = \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{r_0^2}} \quad (2.11)$$

$$v_i^2 = 0.5 * [q_s^2 + h_i^2 + r_0^2 - \sqrt{(q_s^2 + h_i^2 + r_0^2)^2 - 4 * q_s^2 * r_0^2}] \quad (2.12)$$

$$q_s^2 = 2r * (r + b) \quad (2.13)$$

$$r_0^2 = r^2 - b^2 \quad (2.14)$$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (2.15)$$

$$F_n = 1 \text{ y } F_0 = 0 \quad (2.16)$$

Y considerando que S corresponde a la superficie demarcada por el perímetro de la malla puesta a tierra a diseñar en $[m^2]$, h_i corresponde al espesor acumulado de las i primeras capas y que b es la máxima profundidad alcanzada por la estacas y malla en [m]. Además, el espesor de esta capa equivalente corresponde a h_k , es decir, el espesor de las k primeras capas sumadas en [m].

Del mismo modo y considerando las mismas ecuaciones y conceptos recién planteados, Yakobs propone que las capas k+1 hasta la capa n pueden ser agrupadas en una sola con una resistividad calculada por la siguiente expresión:

$$\rho_{eq[k+1,\dots,n]} = \frac{1 - F_k}{\sum_{i=k+1}^n \frac{1}{\rho_i} (F_i - F_{i-1})} \quad (2.17)$$

2.1.4. Cálculo de resistencia de puesta a tierra

Es posible obtener de manera general la resistencia de puesta a tierra si se conoce la matriz de conductancias de esta, ya que solo bastaría con sumar sus términos e invertir el resultado, tal como señala la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n g_{ij}} \quad (2.18)$$

Sin embargo, existen fórmulas aproximadas que permiten obtener resultados similares a los reales que pueden ser ocupadas si se está dispuesto a asumir el error matemático existente. A continuación, se presentarán las fórmulas para las configuraciones de electrodos más sencillas y ocupadas. Es posible obtener más fórmulas simplificadas no descritas en este marco teórico

en el Estándar 142 de la IEEE [8].

2.1.4.1. Barra enterrada verticalmente

Si se tiene una barra de radio a [m] y longitud L [m] en un terreno de resistividad ρ [Ω m] se puede calcular aproximadamente su resistencia de puesta a tierra como: [8]

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L \ln\left(\frac{4L}{a} - 1\right) \quad (2.19)$$

2.1.4.2. Dos barras enterradas verticalmente

Si se tienen dos barras de radio a [m] y longitud L [m] y separadas una distancia D [m] (con D mayor a L) en un terreno de resistividad ρ [Ω m] se puede calcular aproximadamente su resistencia de puesta a tierra como: [8]

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln\left(\frac{4L}{a} - 1\right) \right) + \frac{\rho}{4\pi D} \left(1 - \frac{L^2}{3D^2} + \frac{2L^4}{5D^4} \right) \quad (2.20)$$

2.1.4.3. Varias barras enterradas verticalmente

De acuerdo al *IEEE Standard 142—Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems* [8], es posible estimar la resistencia de varios electrodos iguales enterrados verticalmente a partir de la resistencia de un solo electrodo enterrado verticalmente, siempre y cuando la distancia de separación de los electrodos sea, al menos, de un electrodo e idealmente de dos. Los electrodos deben formar una línea recta, un triángulo hueco, círculo hueco o cuadrado hueco. La adición de electrodos dentro de la periferia de estas formas no reducirá apreciablemente la resistencia de puesta a tierra por debajo de las varillas periféricas solas.

Para este cálculo es posible utilizar la fórmula 2.21 en donde R_n es la resistencia de varios electrodos verticales buscada, R_1 es la resistencia de un solo electrodo vertical, n es la cantidad total de electrodos utilizados y F es un factor obtenible a partir de la tabla 2.2.

$$R_n = \frac{R_1}{n} * F \quad (2.21)$$

Tabla 2.2: Factor F de acuerdo a la cantidad de electrodos verticales usados.

Cantidad de electrodos	F
2	1,16
3	1,29
4	1,36
8	1,68
12	1,8
16	1,92
20	2
24	2,16

2.1.4.4. Barra enterrada horizontalmente

Si se tiene una barra de radio a [m] y longitud $2L$ [m] en un terreno de resistividad ρ [Ω m] a una profundidad $s/2$ [m] se puede calcular aproximadamente su resistencia de puesta a tierra como: [8]

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right) \quad (2.22)$$

2.1.4.5. Anillo conductor enterrado horizontalmente

Si se tiene un anillo de diámetro D [m] y diámetro del conductor d [m] enterrado horizontalmente en un terreno de resistividad ρ [Ω m] a una profundidad $s/2$ [m] se puede calcular aproximadamente su resistencia de puesta a tierra como: [8]

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right) \quad (2.23)$$

2.1.5. Cálculo voltaje de paso y contacto

Para determinar el voltaje de paso y contacto al cual se someterán las personas ante una eventual falla a tierra del sistema, es necesario conocer el potencial en la superficie del terreno originado por la dispersión en este de las corrientes de falla.

Es posible calcular este potencial inducido en el terreno de manera precisa mediante métodos numéricos, que se van volviendo más complejos a medida que el terreno posee más capas y la puesta a tierra posee configuraciones más intrincadas. Sin embargo, y al igual que la resistencia de puesta a tierra, es posible utilizar fórmulas matemáticas aproximadas si se puede asumir el error matemático asociado. Aun así, debido a los alcances de este trabajo, dichas fórmulas no serán presentadas en este marco teórico.

Para el voltaje de contacto hay que entender que el potencial de toda la puesta a tierra y los elementos metálicos del circuito protegido es prácticamente igual, mientras que el potencial inducido en la superficie del terreno va variando a lo largo de este y tiene un valor mínimo

asociado $\phi_{S,min}$. Por ende, el máximo voltaje de contacto al cual se pueden someter las personas equivale a:

$$V_{contacto} = \phi_{conductores} - \phi_{S,min} \quad (2.24)$$

En cuanto al voltaje de paso, este corresponde a la máxima diferencia de potencial que puede existir en el terreno entre los puntos P y P' separados a 1 metro de distancia. Así, el voltaje de paso esta caracterizado por:

$$V_{paso} = MAX(\phi_S(P) - \phi_S(P')) \quad (2.25)$$

2.2. Estado del arte

A continuación, se describirán dos trabajos que pudiesen ser vistos como alternativas de solución al problema planteado pero que, debido a sus características, no pueden ser aplicados en el contexto de las empresas que diseñan e instalan proyectos solares distribuidos.

2.2.1. Diseño eficiente de malla de tierra en parques fotovoltaicos de grandes dimensiones - Nicolás Eduardo Sepúlveda Hermosilla - 2021 [9]

En el 2021 el actual ingeniero Nicolás Sepúlveda, propuso en su memoria de título una metodología para diseñar sistemas de puesta a tierra para parques fotovoltaicos. El trabajo de Sepúlveda consiste en una metodología de 12 pasos, cuya característica principal era hacer uso de las canalizaciones de los conductores y los perfiles de acero de las mesas que soportan los paneles solares como la malla de tierra inicial, lo que permite reducir costos de materiales y movimientos de tierra.

La metodología de Sepúlveda fue aplicada en el parque fotovoltaico Diego de Almagro, el cual cuenta con una potencia de 36 MW instalados en la comuna de Diego de Almagro en la región de Atacama. Allí, el uso de las canalizaciones de los conductores y perfiles de acero permitía reducir en un millón de dólares los costos del proyecto, con respecto a un diseño reticulado optimizado.

Aunque el trabajo de Sepúlveda consiste en una metodología de diseño como la que se quiere plantear en esta memoria de título, no es posible aplicarla a los intereses de las empresas interesadas. Esto ya que la metodología de Sepúlveda está basada en la norma NCh 4/2003 la cual fue reemplazada el 12 de julio del 2021 por 19 pliegos técnicos normativos RIC para las instalaciones de consumo. En particular la metodología a plantear debe estar fuertemente conectada con los pliegos técnicos RIC 05 y RIC 06

Por otro lado, y como el título indica, el trabajo de Hermosilla está pensado para parques fotovoltaicos de grandes dimensiones. No todas las instalaciones de generación solar distribuida están instaladas en el terreno, sino que algunas son posicionadas sobre los techos de los clientes lo que imposibilita usar la principal atracción de la metodología de Hermosilla.

Evidentemente es posible adaptar la metodología propuesta por Hermosilla para que pueda ser compatible con los intereses de las empresas de generación solar distribuida, pero efectivamente esa es la labor que se espera realizar en este trabajo. El diseño de puesta a tierra no es algo novedoso y no se espera “reinventar la rueda” para esta memoria, sino que se busca adaptar las técnicas ya existentes e incluir algunas contemporáneas en una metodología de diseño sencilla que la empresas puedan ocupar.

2.2.2. Software para la determinación de configuración geoelectrica y análisis de mallas de tierra en terrenos estratificados - Francisco Javier Sweet Stein - 2015 [10]

La memoria de título desarrollada por Sweet el 2015 presenta un software trabajado en MATLAB que permite obtener el potencial en toda la superficie, el voltaje de paso, voltaje de contacto, corrientes inyectadas en el terreno, resistividades de las capas del terreno, espesor de las capas del terreno y resistencia de puesta a tierra de cualquier configuración de malla de tierra, a partir de un nuevo método de cálculo que modela los elementos metálicos como esferas en vez de fuentes con forma de barra.

Este software es bastante completo y para su validez fue comparado con métodos de cálculo usados generalmente, logrando grandes semejanzas en todas las pruebas. El software a su vez fue ocupado para reconfigurar una malla de tierra a base de prueba y error de tal manera que permitió reducir el material ocupado y obtener resultados eléctricos mejores.

El principal problema de un programa computacional similar en el caso de las empresas de generación solar distribuida, es que estos programas llegan a ser muy complejos. Actualmente, estas empresas en sus proyectos utilizan puestas a tierra sencillas, por ejemplo, barras conductoras enterradas verticalmente, que pueden ocupar fórmulas generales de cálculo de potencial en la superficie y cálculo de resistencia puesta a tierra asumiendo el error matemático que estas conllevan. Estas empresas no necesitan realizar un cálculo exacto de sus sistemas de tierra, ya que su objetivo principal no es optimizar los costos y materiales, sino cumplir con la normativa vigente.

Por otro lado, un software complejo puede ser desafiante para el contexto de las empresas de generación solar distribuida, ya que suelen contar con una rotación de empleados grande. Destinar recursos en capacitaciones extensas cada poco tiempo puede ser contraproducente.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Medición de la resistividad en el terreno

Por lo general, los proyectos de generación de energía solar distribuida comienzan con una visita previa al lugar de instalación, para verificar las condiciones de la instalación eléctrica existente y determinar si es posible continuar con el proyecto solar.

Dado que se requiere realizar mediciones en el terreno para conocer ciertas características del mismo, se sugiere que el primer paso para el diseño del sistema de puesta a tierra se realice durante esta visita previa. No obstante, esto es solo una recomendación, ya que la información necesaria para este paso también puede adquirirse en una visita independiente o mediante datos adquiridos previamente.

En particular, en este paso se desea conocer como se comporta el terreno ante estímulos eléctricos para, en pasos posteriores, conocer el número de estratos y la resistividad de estos. Para ello, se detallarán dos métodos ampliamente utilizados en el terreno: el método de Wenner y el método de Schlumberger.

3.1.1. Método de Wenner

Tal como se mencionó durante el marco teórico de este documento, el método de Wenner consiste en un método de medición geofísico del terreno en el cual se ocupan dos electrodos para inyectar corriente eléctrica en el terreno y otros dos electrodos (cuatro electrodos en total) para medir la caída de potencial eléctrico inducido en el terreno, todo esto con la ayuda de un dispositivo electrónico. Luego, mediante la relación V/I es posible obtener la resistencia eléctrica aparente del terreno.

La idea de este método de medición es realizar diferentes mediciones mientras se van separando cada vez mas los electrodos de corriente y voltaje. Esto ya que a medida que los electrodos de corriente se van alejando, la corriente eléctrica penetrará mas profundo en el terreno pasando así por los diferentes estratos de este. De esta forma se espera que la resistencia aparente encontrada varíe a medida que se separan los electrodos y no sea un valor constante debido a la variabilidad del terreno y sus estratos.

En el método de Wenner los cuatro electrodos son enterrados en el terreno en una misma

línea, siendo los electrodos de corriente enterrados en los extremos de esta línea y los electrodos de voltaje enterrados en el centro de la línea. El espacio entre cada electrodo es el mismo y se denotará bajo la letra a , mientras que la profundidad de enterramiento de cada electrodo sera denotado bajo la letra b , tal como muestra la figura 3.1. Tanto a como b deben ser medidos en metros [m].

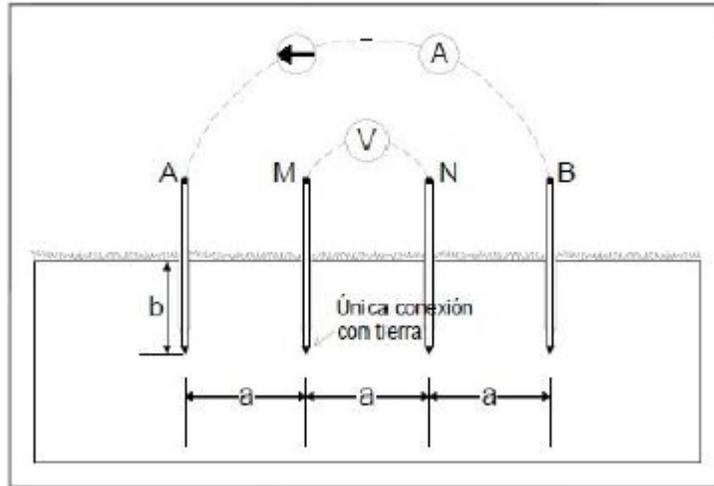


Figura 3.1: Disposición de electrodos en método de Wenner.

Como se mencionó anteriormente, la idea es realizar diferentes mediciones al ir variando la distancia a entre los electrodos e ir calculando la resistencia aparente en cada medición en Ohms [Ω], denotada por la letra R . A partir de esta resistencia aparente es posible calcular la resistividad aparente ρ_a de cada medición según la fórmula 3.1 en ohm metro [Ωm] siempre y cuando la distancia de separación de electrodos a sea al menos 20 veces mayor que la profundidad de enterramiento b .

$$\rho_a = 2 * \pi * a * R \quad (3.1)$$

Para un mejor seguimiento y entendimiento de las mediciones realizadas, se sugiere anotar los datos como la tabla 3.1, en donde se lleva registro de la distancia a de separación de los electrodos por medición, la resistencia aparente de la medición y la resistividad aparente de la medición.

Tabla 3.1: Tabla de datos para el método de Wenner.

N ^o	a	R	ρ_a
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

3.1.2. Método de Schlumberger

El método de Schlumberger es otro método de inspección geofísica del terreno. Tiene un parecido considerable con el método de Wenner ya que aquí también se utilizan cuatro electrodos en una misma línea, dos que inyectan corriente al terreno y dos que miden la diferencia de potencial inducida. Todo esto con la finalidad de calcular la resistencia eléctrica aparente del terreno bajo la relación V/I y así calcular la resistividad aparente mediante una fórmula matemática.

La diferencia principal entre ambos métodos radica en que en este, los electrodos centrales (electrodos de voltaje) se mantienen fijos a lo largo de las distintas mediciones. Es decir, solamente se deben separar los electrodos de corriente al llevar a cabo las diferentes mediciones en el terreno.

En este método la distancia de separación entre los electrodos en la primera medición debe ser igual y será marcada por la letra a y medida en metros [m]. Las mediciones siguientes deben seguir un patrón específico ya que los electrodos de corriente deben ser colocados en distancias múltiplos de a . En otras palabras, los electrodos de corriente en la primera medición deben estar a una distancia a de los electrodos de voltaje, en la segunda medición deben estar a una distancia de $2a$ de los electrodos de voltaje y en la medición n deben estar a una distancia na de los electrodos de voltaje. Esta disposición particular se muestra gráficamente en la figura 3.2.

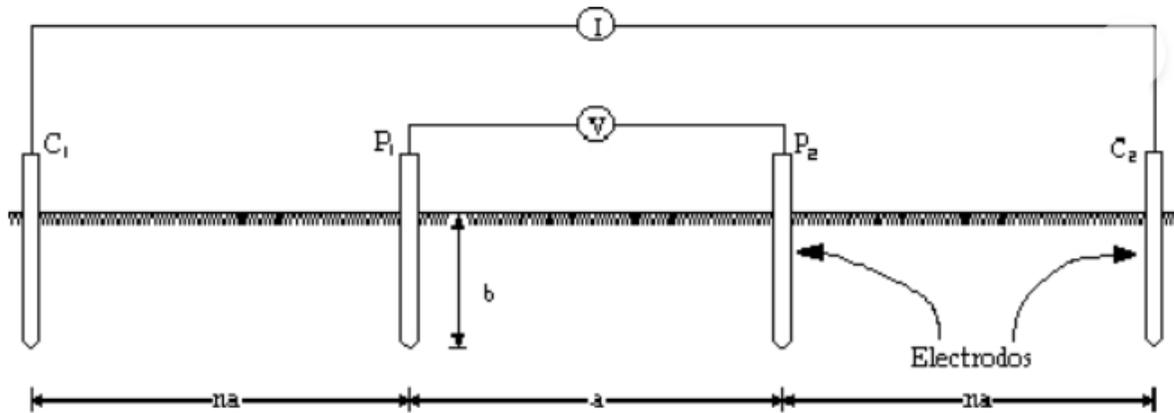


Figura 3.2: Disposición de electrodos en método de Schlumberger.

Con este método de medición es posible calcular la resistividad aparente ρ_a en $[\Omega m]$ de cada medición a través de la fórmula 3.2.

$$\rho_a = 2 * \pi * R * (n + 1) * na \quad (3.2)$$

Finalmente, y al igual que en el método de Wenner, es aconsejable llevar un registro de las mediciones realizadas para su posterior entendimiento y procesamiento. La tabla sugerida para el método de Schlumberger es la tabla 3.2 en donde se lleva registro del número de medición, la distancia a inicial de los electrodos, la distancia na entre los electrodos de voltaje y corriente, la resistencia R de la medición y la resistividad aparente ρ_a de la medición.

Tabla 3.2: Tabla de datos para el método de Schlumberger.

N°	a	na	R	ρ_a
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

3.2. Recopilar datos del sistema eléctrico solar

El segundo paso para diseñar de manera correcta el sistema de puesta a tierra está directamente relacionado con el desarrollo del sistema eléctrico solar que se está implementando.

En este paso se espera poder recopilar información sobre distintos aspectos del sistema eléctrico solar para el cual se está diseñando el sistema puesta a tierra. Debido a que este paso no necesita de información de la resistividad del terreno se puede realizar antes que el paso anteriormente señalado.

La información a recopilar debería ser trivial para los profesionales a cargo de diseñar el sistema solar y, por lo tanto, no hay un gran desafío en este paso. La idea central de este paso es preparar al diseñador del sistema de puesta a tierra con la información requerida para los pasos siguientes, dado que este diseñador puede o no estar involucrado en el diseño del sistema eléctrico solar.

Por como están estructurados los siguientes pasos de la metodología, solo es necesario contar con dos datos del sistema solar: la corriente de operación de la protección de los equipos y si el sistema se ubica en un lugar húmedo o seco.

Para mayor claridad, la corriente de operación de la protección de los equipos se refiere a la corriente de la protección termomagnética que protege a todo el sistema eléctrico solar. Esta protección puede estar ubicada dentro del inversor solar que se utiliza en la instalación, como también en una caja de protecciones aguas arriba del inversor.

Dependiendo si el diseñador se guía fielmente o no por esta metodología, pueden ser útiles más datos del sistema eléctrico solar como los listados a continuación:

- Cantidad de paneles solares.
- Número de strings.
- Corriente de falla de los paneles solares.

3.3. Establecer resistencia de puesta a tierra límite

La idea de este paso en la metodología es poder establecer el valor máximo de la resistencia de puesta a tierra que puede tener el sistema de puesta a tierra a diseñar.

No existen una gran dificultad técnica para establecer dicho valor, ya que la fórmula matemática mas difícil que se puede llegar a ocupar consta solamente de una división de dos valores ya adquiridos con anterioridad. La “dificultad” existente en este paso radica en elegir el conjunto de normas que ayudaran a calcular el valor de la resistencia.

Lo anterior se debe a una incongruencia entre lo señalado en la Instrucción técnica RGR N°02/2020 [11], que acota los requerimientos que se deben observar para el diseño, ejecución, inspección y mantención de instalaciones fotovoltaicas distribuidas y lo señalado en el Pliego técnico normativo RIC N°06 [4], que establece los requisitos de seguridad que deben cumplir los sistema de puesta a tierra en las instalaciones de consumo del país.

La instrucción técnica señalada es el primer documento al cual las empresas de generación distribuida recurren al momento de ejecutar estos proyectos, ya que la SEC se guía por

dicho documento para aprobar o rechazar dependiendo si se cumple o no lo allí señalado. El documento, en su punto 17, señala las condiciones que debe cumplir la puesta a tierra de las instalaciones fotovoltaicas y recién en el punto 17.8 comenta sobre los valores numéricos permisibles de esta.

Particularmente el punto 17.8 de la RGR N°02/2020 [11] señala que el sistema puesta a tierra puede superar el valor de 20 Ohms cuando se cumplan 4 condiciones:

- En instalaciones de consumo con empalme inferior a 10 kW de potencia.
- En instalaciones de consumo que cuenten con un esquema de conexión del sistema puesta a tierra TN.
- Cuando el sistema fotovoltaico utilice el sistema puesta a tierra de la instalación de consumo.
- Cuando el valor resultante de la puesta a tierra no supere los 80 Ohm.

Dejando de lado un análisis detallado de los puntos anteriormente señalados, se pueden inferir rápidamente dos cosas. En primer lugar, que normalmente la resistencia de puesta a tierra de estas instalaciones fotovoltaicas debe ser de un máximo de 20 Ohms. En segundo lugar, que en casos particulares se podría llegar hasta una resistencia máxima de 80 Ohms.

Sin embargo, los puntos anteriores fueron extraídos del pliego técnico normativo RIC N°6 [4], que en su punto 6 detalla los mismos valores permisibles, es decir, valores de resistencia de 20 Ohms por defecto con la posibilidad de optar por 80 Ohms en casos específicos. No obstante, es importante señalar que el punto 6 de este pliego hace referencia a la tierra de servicio y no a la tierra de protección, que es el tipo de tierra que debe construirse en los proyectos fotovoltaicos distribuidos. Esta confusión en el tipo de tierras puede resultar en valores de resistencia inseguros, ya que lo que se busca con las tierras de protección son valores resistivos bajos para proporcionar un camino eléctrico prioritario para las corrientes en caso de falla.

Un valor que se podría respetar como límite máximo en estos casos es el valor calculado por la fórmula 2.9, la cual se encuentra en el marco teórico y se extrae del RIC N°6 [4], específicamente del punto 7 que trata sobre la tierra de protección. Para utilizar esta fórmula, es necesario conocer la corriente de operación de la protección principal de los equipos fotovoltaicos y el tipo de lugar en donde se sitúa la instalación. Ambos datos debieron haber sido obtenidos en el paso anterior.

En resumen, hay dos formas de obtener el valor máximo que la puesta a tierra a instalar debe tener. La primera opción es imponer un valor máximo de 20 Ohms (o 80 Ohms en ciertos casos), que es aceptado por la SEC, pero que puede llegar a ser inseguro. La segunda opción es calcular el valor máximo utilizando la fórmula 2.9, que proporciona un valor más bajo y, por lo tanto, más seguro, pero puede ser más complejo de obtener.

3.4. Obtener número de estratos del terreno y resistividades aparentes de estos

Como se vio en el marco teórico, el terreno esta compuesto por diferentes capas de diversos materiales (tierra, grava, piedra, etc.). Estos estratos son modelados de manera paralela entre si y paralelos a la superficie, con una resistividad aparente constante a lo largo del estrato. La finalidad de este paso es determinar el número de estratos con los que se está trabajando en el terreno y la resistividad aparente de cada uno de ellos, todo esto con los datos obtenidos en el paso número 1.

Para ello existen varias alternativas, una de las mas tradicionales es comparar los datos obtenidos con las curvas modelo generadas por Orellana y Mooney de manera manual. Sin embargo, se sugiere hacer uso de las capacidades tecnológicas actuales y utilizar un software adaptado para este mismo propósito.

A continuación, se explicará como utilizar el programa computacional IPI2WIN (programa de distribución libre) que permite obtener el número de estratos del terreno y la resistividad aparente de estos con los datos ya obtenidos en el paso inicial. Se sugiere este programa en concreto debido a su facilidad de uso, poco espacio de almacenamiento, y a su capacidad de admitir datos tanto de la configuración de Wenner o Schlumberger anteriormente explicadas. Sin embargo, es necesario aclarar que este no es el único programa que puede realizar las funciones necesarias, habiendo libertad en el método ocupado para obtener el número de estratos y resistividades aparentes.

Lo primero que se ve al iniciar el programa una vez abierto, es una ventana en su mayoría en blanco, con su respectiva cinta de opciones como se ve en la figura 3.3. Para iniciar un nuevo proyecto hay tres opciones: Clickear en Archivo y luego en Crear, clickear en el botón con una imagen de hoja en blanco marcado en un cuadro rojo en la figura 3.3 o usar el atajo de esta opción que por defecto es Ctrl + Alt + N.

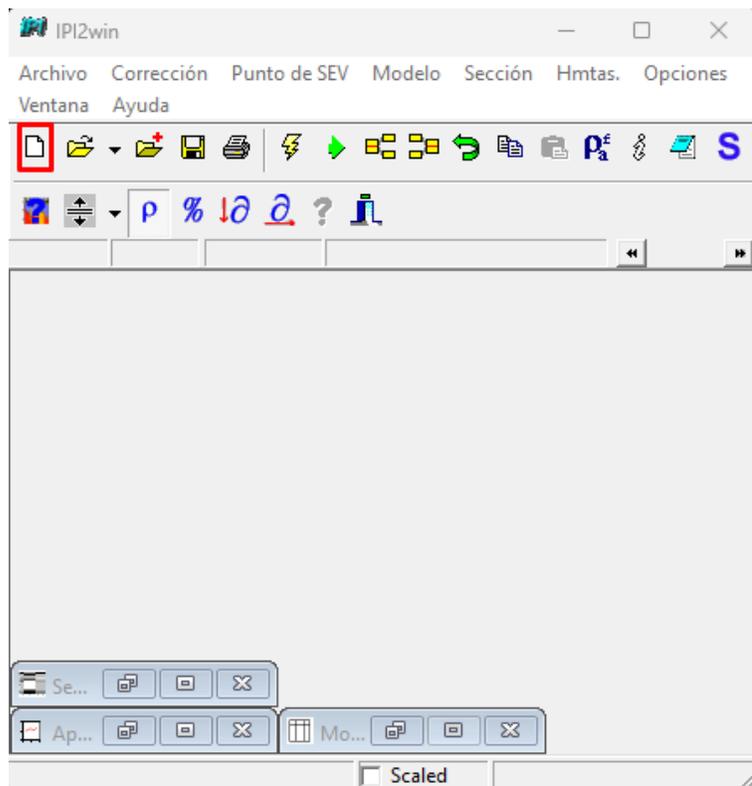


Figura 3.3: Ventana inicial de IPI2WIN.

Una vez creado un nuevo proyecto se abrirá una nueva ventana con similitud a la de la figura 3.4 en donde se podrán ingresar los datos tomados en la medición del terreno inicial.

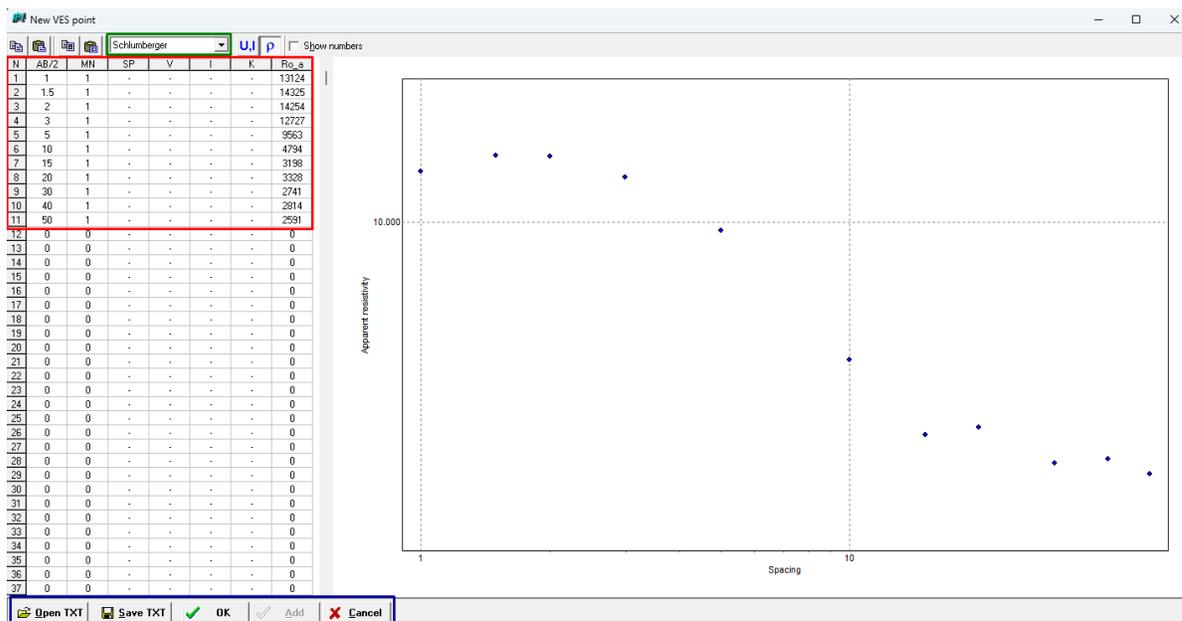


Figura 3.4: Ventana de ingreso de datos de IPI2WIN.

Los datos obtenidos en el primer paso deben ser introducidos en la tabla de este nuevo

proyecto en el espacio marcado con un cuadro rojo en la figura 3.4, notar que este campo admite pegar datos que se copien desde otras fuentes, como Microsoft Excel, sin embargo hay que tener cuidado al realizar esta maniobra debido al distinto uso de comas decimales y puntos decimales que ambos programas puedan tener. A modo de ejemplo la figura 3.4 muestra los datos obtenidos en un terreno a partir de 11 mediciones. Los datos deben ser colocados en esta tabla de esta manera: En $AB/2$ introducir la distancia entre el centro de medición y los electrodos de corriente, en MN la distancia entre los electrodos de voltaje y en Ro_a la resistividad aparente calculada para esa medición. Notar además que se debe especificar el método de medición utilizado en el espacio específico remarcado en verde en la figura 3.4. Los dos métodos de medición indicados en este documento, Wenner y Schlumberger, aparecerán ahí como Wenner (alpha) y Schlumberger, respectivamente.

A medida que los datos sean ingresados en el campo correspondiente, se podrá visualizar el gráfico que el par $(AB/2, \rho_a)$ generan a la derecha de la ventana. Una vez ingresados y revisados todos los datos, se debe presionar el botón OK ubicado al fondo del programa para guardar y continuar el proceso. El botón OK se ubica abajo de la ventana del proyecto en conjunto con otros botones (recuadro azul en la figura 3.4) que permiten abrir un proyecto pasado, guardar el proyecto actual para proseguir después o cancelar el proyecto actual.

Una vez apretado el botón Ok y guardado los datos, se llegará a la ventana final en donde se podrán visualizar y actuar sobre los datos buscados: el número de estratos y su resistividad. Un ejemplo de esta ventana se muestra en la figura 3.5

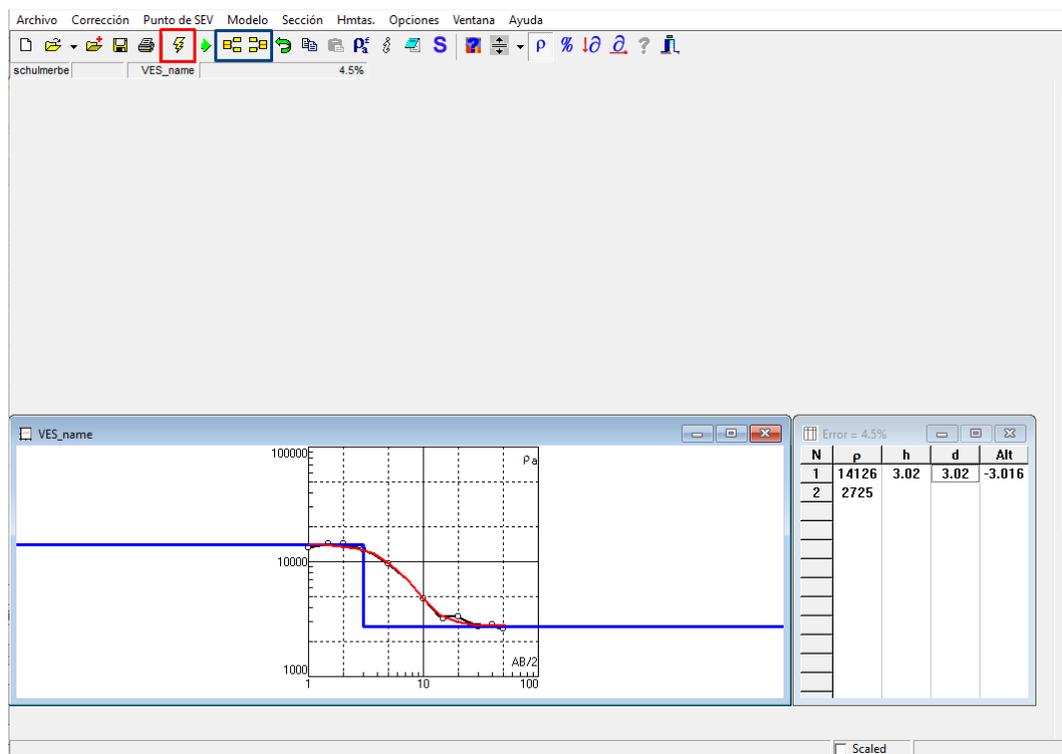


Figura 3.5: Ventana de resultados de IPI2WIN.

Esta ventana muestra dos sub-ventanas importantes, en la primera se muestra un gráfico

con dos curvas, una negra y otra roja cuya interpretación lleva a los datos de la segunda sub-ventana en donde se muestra el número de estratos, su altura (h) y la resistividad de cada estrato (ρ). Además es posible ver el error asociado a la interpretación actual arriba de la segunda sub-ventana.

En el ejemplo de la figura 3.5 se observa un terreno de dos estratos, el primero con una profundidad de 3.02 metros y resistividad de $14126 \Omega m$ y el segundo con profundidad infinita y resistividad de $2725 \Omega m$. Todo esto con un error del 4.5 %.

Es posible, de ser deseado, reducir el error mostrado en pantalla al modificar la curva roja (ideal) y superponerla de mejor manera a la curva negra (medida). Esto se puede lograr al mover las líneas azules con el ratón del ordenador, cada línea azul modifica la interpretación de un estrato específico por lo que, a más estratos, aparecerán más líneas azules en pantalla.

Este movimiento de las líneas azules (y por consiguiente la curva roja) puede ser realizado de manera automática si se ocupa el botón con forma de rayo en la parte superior de la ventana (marcado en un cuadro rojo en la figura 3.5). Al hacer esto el programa modificará la interpretación de tal forma de reducir el error al mínimo posible con la cantidad de estratos actuales.

Por último, se puede modificar la interpretación de los datos agregando o quitando estratos con ayuda de los botones marcados en un cuadro azul en la figura 3.5. Si bien agregar estratos debiese reducir el error al permitir una mayor flexibilidad de la curva roja, se tiene que encontrar un equilibrio entre la cantidad de estratos y el error. Esto último se debe a que en pasos posteriores tener demasiados estratos puede complicar el cálculo por lo que hay que cuestionar si el error que disminuye al agregar un estrato compensa la dificultad posterior añadida.

3.5. Definir geometría de la malla a tierra

El siguiente paso consiste en determinar la parte más tangible del sistema, es decir, la geometría del mismo. Dado que se trata de proyectos de relativa baja potencia, se detallarán únicamente algunos tipos de geometrías, correspondientes a un electrodo enterrado verticalmente, un electrodo enterrado horizontalmente, dos electrodos enterrados verticalmente y tres electrodos enterrados verticalmente. Aun así, si se tienen los conocimientos necesarios sobre otro tipo de geometría sería posible aplicarla.

No existe una forma específica para elegir la geometría ideal en cada proyecto y puede ser necesaria la experiencia humana para determinarla. Esto se debe a que la geometría ideal de un proyecto sería aquella que entrega una resistencia a tierra aceptable con un uso de material menor, sin embargo, para poder calcular la resistencia a tierra de una malla es necesario utilizar fórmulas que en su mayoría son aplicables en terrenos de dos o un estrato que puede no ser el caso en algunos terrenos.

Para solucionar el inconveniente anterior es posible encontrar un terreno equivalente de dos o un estrato cuando se esté en presencia de terrenos de tres o más estratos (que co-

rresponde al paso siguiente), no obstante, para poder calcular dicho terreno equivalente es necesario conocer la geometría de la malla. Este pequeño bucle obliga a determinar en primera instancia la geometría de la malla “a ciegas” en casos en que no se puede calcular la resistencia a tierra de manera inmediata.

A pesar del problema anteriormente planteado, la experiencia humana puede ser de ayuda a la hora de determinar una malla en estas situaciones ya que terrenos similares (de estratos y resistividades parecidas) pueden haber sido resueltos en el pasado y por ende sería posible utilizar soluciones parecidas. Por otro lado, la experiencia actual ha demostrado que un electrodo vertical permite alcanzar resistencias a tierra aceptables para la SEC (20 Ohm u 80 Ohm) por lo que esta configuración puede llegar a ser útil en aquellos proyectos cuya resistencia límite calculada anteriormente sea similar o inferior.

3.6. Calcular resistividad equivalente del terreno

Como ya se mencionó anteriormente, las fórmulas para calcular una aproximación de la resistencia de puesta a tierra final son utilizadas, en su mayoría, en terrenos de dos o un estrato. Por ende, en terrenos de tres o más estratos es necesario aplicar este paso con el fin de calcular un terreno equivalente al del proyecto pero que posea dos o un estrato.

La fórmula para lograr este cometido corresponde a la fórmula 2.10 expuesta en el marco teórico. Dicha fórmula permite agrupar los estratos desde el más cercano a la superficie hasta un estrato k arbitrario en un solo estrato equivalente. La fórmula 2.17 expuesta en el mismo capítulo permitiría agrupar los estratos $k+1$ hasta el último en un solo estrato. Nótese que es posible utilizar solamente la fórmula 2.10 desde el primer hasta el último estrato en caso de que se quiera trabajar con un solo estrato equivalente en vez de dos.

Es importante destacar ciertos casos específicos que pueden traer problemas a la hora de hacer los cálculos descritos. Como se ha visto, las fórmulas 2.10 y 2.17 utilizan el área demarcada por el perímetro de la malla para realizar los cálculos de equivalencia, sin embargo, no existe un área asociada a mallas compuestas por un electrodo vertical o dos electrodos verticales. No obstante, es posible en el caso de un electrodo usar el área que ocupa la sección transversal del propio electrodo para este cálculo, si bien es un área pequeña y puede que entregue resultados atípicos en ciertas partes del cálculo, el resultado final del cálculo será el correcto. En el caso de dos electrodos verticales es posible utilizar la misma área del caso anterior, es decir, utilizar el área de un solo electrodo.

En cuanto a reducir el terreno a dos estratos o solo a uno, dependerá de algunos factores. Primero, es necesario clarificar que una reducción a dos estratos siempre conllevará resultados más precisos que una reducción a un estrato por lo que, en caso de ser factible, se debería optar por una reducción a dos estratos. Segundo, dependiendo de las fórmulas de cálculo de resistencia de puesta a tierra disponibles y la geometría seleccionada, estaremos o no obligados a elegir una cantidad de estratos, esto ya que ciertos cálculos de resistencias para ciertas geometrías pueden estar disponibles solamente para dos estratos o solamente para un estrato, imponiendo la decisión a tomar.

3.7. Calcular y comparar la resistencia de puesta a tierra

Para finalizar el proceso de diseño de puesta a tierra en proyectos solares distribuidos, es necesario calcular la resistencia a tierra que teóricamente tendría la geometría de malla seleccionada.

Para el cálculo de la resistencia a tierra es posible utilizar alguna de las fórmulas presentes en el capítulo 2.1.4, dependiendo de la geometría seleccionada y el número de estratos disponibles. Por otro lado, es posible utilizar fórmulas no explicitadas en este informe, pero que de igual forma sean válidas en el contexto del proyecto actual.

Una vez calculada dicha resistencia a tierra teórica, es necesario comparar el valor obtenido con el valor límite obtenido en la sección 3.3 de esta metodología. El criterio para aceptar la geometría propuesta en el terreno del proyecto es simple: si la resistencia teórica es menor a la resistencia límite, se puede proseguir con la construcción de la puesta a tierra. Aun así, hay que tener cuidado y dejar un margen mínimo entre el valor teórico y el valor límite, ya que, como se ha mencionado a lo largo de este informe, se han utilizado fórmulas y métodos simplificados en los distintos pasos, lo que conlleva a un error matemático. Este error conlleva a que el valor teórico calculado no sea igual al valor real que la malla de tierra tendrá, el cual puede ser mayor o menor, por lo que valores teóricos muy cercanos al valor límite pueden significar que el valor real supere al valor límite.

En el caso en que el valor de resistencia calculado supere el valor límite o que ambos valores sean muy cercanos, se deberá volver atrás en los pasos y modificar el proyecto o el diseño de alguna manera, y así obtener un valor más idóneo.

Una manera de lograr esto es modificando el proyecto solar. En el caso de que se haya optado por usar la fórmula 2.9 en el paso 3.3, se podría disminuir la corriente de operación de la protección eléctrica general del proyecto. De esta manera, la fórmula 2.9 arrojaría un valor de resistencia límite mayor que la anterior, lo cual puede ser más alcanzable.

Otro método para obtener resistencias teóricas por debajo del límite calculado es volver al paso 3.5 y definir una geometría con menor resistencia a tierra. En teoría, a mayor cantidad de electrodos, menor resistencia a tierra se obtendrá.

Una vez obtenida una geometría de malla cuya resistencia calculada sea significativamente menor que la resistencia límite calculada, se puede considerar concluido el diseño de la misma y proceder con la construcción e instalación. Sin embargo, es importante dar seguimiento a la construcción de la puesta a tierra y verificar que el valor medido final sea inferior al valor límite establecido. En caso de que esta condición no se cumpla, se deberá evaluar cómo modificar el diseño, posiblemente utilizando la malla ya instalada, para lograr la conformidad con los estándares requeridos.

3.8. Voltaje de paso y de contacto

Si bien se mencionó la importancia del voltaje de paso y el voltaje de contacto durante el marco teórico, esta metodología no incluye el cálculo y la responsabilidad de estos conceptos. Lo anterior se debe a que no es fácil simplificar el cálculo de los valores finales que estos fenómenos podrían alcanzar, para lo cual se necesitaría software más especializado y profesionales más capacitados, lo cual no es la idea de esta metodología. Otro aspecto clave que permite apartar estos términos del diseño de la malla de puesta a tierra es el hecho de que actualmente la SEC no verifica si este tipo de fallas en proyectos solares distribuidos están dentro de límites seguros, verificando solamente el valor de la resistencia a tierra. Este comportamiento de la SEC puede deberse al hecho de que, al tratarse de proyectos de baja potencia, los voltajes de paso y contacto alcancen valores seguros con una resistencia bien acotada.

3.9. Resumen

Con el fin de facilitar la implementación de la metodología propuesta, se presenta a continuación un resumen de los pasos anteriormente mencionados. Cabe destacar que este resumen es básico y busca recordar información general de los pasos propuestos y, por lo tanto, se asume que el lector leyó con anterioridad el capítulo en su totalidad.

1. **Medición de la resistividad en el terreno:** Con el fin de estimar la cantidad de estratos del terreno y sus resistividades en pasos posteriores es necesario realizar mediciones del terreno. Para ello, se sugiere ejecutar varias mediciones geofísicas poco invasivas durante la primera visita en terreno con métodos típicos como el de Wenner, el de Schlumberger u otros.
2. **Recopilar datos del sistema eléctrico solar:** Para el correcto diseño del sistema de puesta a tierra es necesario conocer datos sobre el sistema eléctrico solar, como la corriente de operación de la protección termomagnética del sistema y las condiciones de humedad del terreno.
3. **Establecer resistencia de puesta a tierra límite:** Con el fin de obtener un diseño normado es necesario conocer la resistencia máxima que la puesta a tierra puede tener. Para ello, se debe establecer la resistencia máxima como aquella aceptada actualmente por la SEC (20 Ohms en general y 80 Ohms en algunos casos) o aquella calculada mediante la fórmula 2.9.
4. **Obtener número de estratos del terreno y resistividades aparentes:** Utilizando los datos de las mediciones y cálculos realizados en el primer paso, es posible estimar la cantidad de estratos del terreno y las resistividades de estos. Si bien existen varios métodos para ello, se sugiere el uso del programa IPI2WIN.
5. **Definir geometría de la malla a tierra:** Se debe elegir la configuración de la malla de puesta a tierra, considerando opciones como electrodos verticales u horizontales y la disponibilidad de estos. Además, se debe tener en cuenta la experiencia humana en terrenos similares y la resistencia límite máxima establecida.

6. **Calcular resistividad equivalente del terreno:** Si el terreno tiene tres o más estratos, es aconsejable utilizar el método de Yakobs para reducirlo a un terreno equivalente de dos o más estratos. Esto ya que la mayoría de fórmulas simplificadas para el cálculo de resistencia asumen este tipo de terrenos. Sumado a esto, todas las fórmulas para este cálculo presentes en el marco teórico de esta memoria se aplican en terrenos de un solo estrato.
7. **Calcular y comparar la resistencia de puesta a tierra:** Para finalizar, es necesario calcular la resistencia teórica de la configuración seleccionada utilizando las fórmulas correspondientes. Luego, se debe comparar este valor con el valor límite establecido, teniendo en cuenta un margen de error debido a las simplificaciones realizadas durante el proceso. Por último, si se encuentra que el valor calculado supera el límite, es necesario volver a pasos anteriores para modificar el diseño efectuado.

Capítulo 4

Implementación

En este capítulo del informe se presentarán los detalles y resultados obtenidos de la implementación de la metodología propuesta en un caso práctico. Cabe destacar que aquí solo se mostrarán los resultados, ya que la discusión y análisis de los mismos se llevarán a cabo en un capítulo posterior.

4.1. Generalidades

La implementación de la metodología se llevó a cabo en un terreno eriazo perteneciente al Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) en la comuna de Cerrillos. En el terreno seleccionado no existe un sistema solar distribuido. La implementación de la metodología se realizó únicamente para comprobar su validez y no con el propósito de diseñar y construir un sistema a tierra para su uso posterior. Esto se fundamenta en el hecho de que los parámetros de un sistema de puesta a tierra no dependen de su conexión a un sistema eléctrico.

Por otro lado, la implementación no fue llevada a cabo por una empresa dedicada a la generación distribuida solar, sino que fue realizada por el memorista en compañía de su profesor guía y personal del IDIEM.

4.2. Medición de la resistividad en el terreno

La medición de la resistividad del terreno se llevó a cabo el día 4 de julio del 2023. Para realizar esta medición, se utilizó un equipo DET4TC2 de la marca Megger, proporcionado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Chile.

En el terreno se realizaron 20 mediciones mediante el método de Wenner, el cual fue explicado en la sección 3.1.1 de este informe. Tanto los datos obtenidos de esas mediciones como las resistividades calculadas mediante la fórmula 3.1 se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Datos obtenidos en terreno mediante método de Wenner.

Número de medición	Espaciamiento entre electrodos (m)	Resistencia (Ohm)	Resistividad (Ohm m)
1	0,2	42,7	53,6584025
2	0,4	30	75,3982237
3	0,6	24,8	93,4937974
4	0,8	21,6	108,573442
5	1	17,9	112,469017
6	1,2	15,52	117,018043
7	1,4	13,47	118,488309
8	1,6	11,47	115,309017
9	1,8	10,39	117,508132
10	2	9,37	117,746893
11	2,2	8,55	118,186716
12	2,4	8,22	123,95468
13	2,6	7,82	127,749724
14	2,8	7,42	130,539458
15	3	7	131,946891
16	3,2	6,63	133,304059
17	3,4	6,51	139,072024
18	3,6	6,38	144,3122
19	3,8	6,25	149,225651
20	4	6,17	155,069013

El gráfico 4.1 muestra de manera más gráfica cómo se comporta la resistividad aparente calculada del terreno, a medida que la distancia de separación de los electrodos del equipo incrementa.

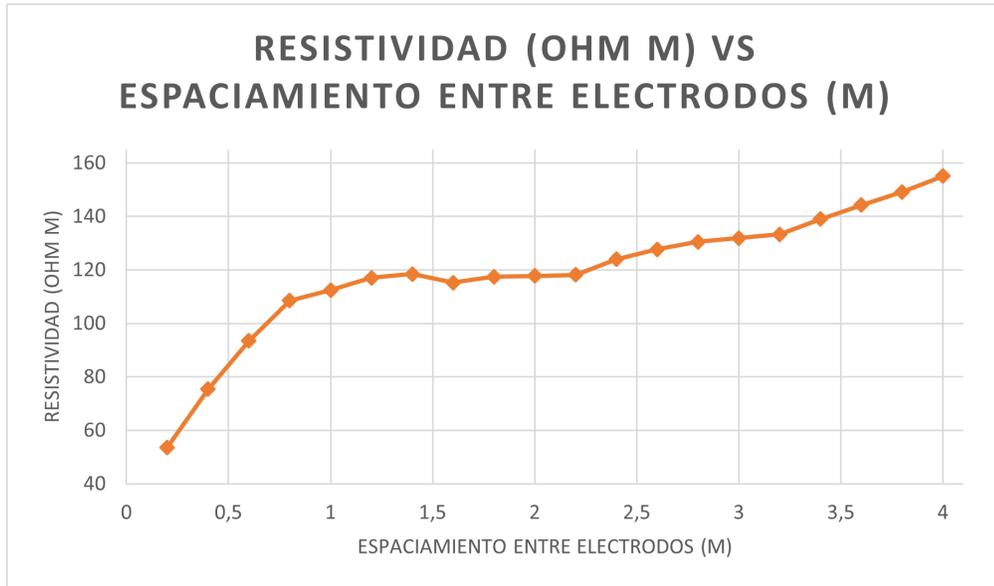


Figura 4.1: Resistividad calculada en función del espaciamiento entre electrodos.

4.3. Recopilación de datos del sistema solar

Como ya se mencionó, no existe realmente un sistema solar distribuido en el terreno. Por ende, fue necesario suponer parámetros realistas de un supuesto sistema solar a proteger. Los parámetros necesarios para continuar con la implementación de la metodología se detallan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros del supuesto sistema solar distribuido a proteger.

Datos del sistema	
Protección (A)	16
Tipo de lugar	Húmedo

4.4. Establecimiento de resistencia de puesta a tierra límite

Como lo que se busca en esta implementación es verificar que la metodología funciona a nivel general, se tendrán en cuenta ambos límites mencionados en la sección 3.3 de este informe. Es decir, se considerará tanto el valor de 20 Ohms aceptado por la SEC como el valor calculado a través de la fórmula 2.9 gracias a los datos de la tabla 4.2. Estos dos datos se muestran a continuación en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Resistencias límites a considerar.

Resistencia límite (Ohms)	
Resistencia límite calculada	3.75
Resistencia límite SEC	20

4.5. Obtención del número de estratos del terreno y resistividades aparentes de estos

Mediante el uso del programa IPI2WIN, mencionado en la sección 3.4, se obtuvieron los parámetros de dos diferentes terrenos con distinto número de estratos (2 y 3 estratos) que podrían coincidir con el terreno utilizado. Dichos datos se muestran en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4: Parámetros del terreno de dos estratos.

2 estratos del terreno (4.71 % de error)			
Capa	Resistividad (ohm m)	Altura (m)	Altura acumulada (m)
1	40.3	0.168	0.168
2	142	—————	—————

Tabla 4.5: Parámetros del terreno de tres estratos.

3 estratos del terreno (3.48 % de error)			
Capa	Resistividad (ohm m)	Espesor (m)	Profundidad acumulada (m)
1	28.3	0.1	0.1
2	128	3.9	4
3	388	—————	—————

La diferencia de error entre el cambio de dos estratos a tres estratos es de un 1.23 %, lo cual es bajo. Además, el error asociado entre el terreno de tres estratos dictado por IPI2WIN y las mediciones reales es de un 3.48 %, lo cual también es bajo. Por estos dos motivos, se decidió proseguir con los parámetros del terreno de 3 estratos en los pasos siguientes y no se consideró necesario obtener los parámetros de un terreno de 4 estratos que coincida con las mediciones a través del programa.

4.6. Definición de la geometría de la malla a tierra

Para esta implementación, se propusieron dos geometrías de malla distintas. La primera es un único electrodo enterrado verticalmente, mientras que la segunda corresponde a cuatro electrodos enterrados verticalmente, separados una distancia de 1 metro entre sí. Los datos de todos los electrodos son idénticos y están resumidos en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Datos de los electrodos utilizados durante la implementación.

Datos de los electrodos	
Largo (m)	0.5
Profundidad de enterramiento (m)	0.4
Diámetro (m)	0.01

4.7. Cálculo de la resistividad equivalente del terreno

Debido a que las fórmulas presentes en la sección 2.1.4 del marco teórico aplican para terrenos de un solo estrato, es necesario reducir el terreno de tres estratos aceptado en la sección 4.5 a un terreno equivalente de un estrato con la ayuda de las fórmulas presentadas en la sección 2.1.3.2. El valor final de la resistividad del terreno equivalente de un estrato se presenta en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Resistividad del terreno equivalente de un estrato.

Resistividad equivalente (Ohm m)
75.43

4.8. Cálculo y comparación de la resistencia de puesta a tierra

El cálculo para obtener la resistencia de puesta a tierra del diseño del electrodo vertical se realizó mediante la fórmula 2.19, mientras que para el cálculo de los cuatro electrodos verticales se utilizó la fórmula 2.21. Los valores de resistencia calculados se presentan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Resistencias calculadas para las configuraciones escogidas.

Resistencia de puesta a tierra calculada (Ohm)	
Un electrodo	143.12
Cuatro electrodos	48.66

La figura 4.2 compara estas resistencias calculadas con los límites impuestos en pasos anteriores y señalados en la tabla 4.3.

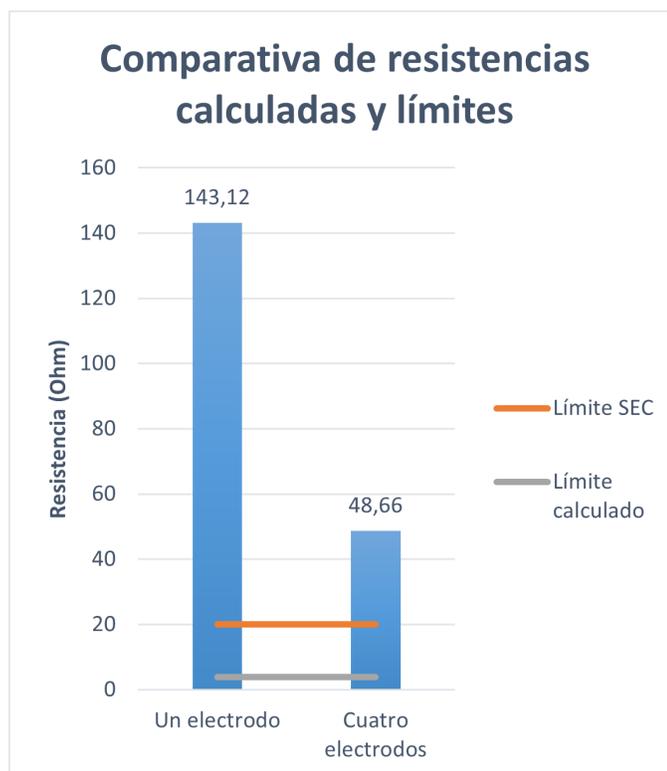


Figura 4.2: Comparación entre resistencias a tierra calculada y límites establecidos.

4.9. Comparación empírica

Con el fin de comprobar de mejor manera la validez de la metodología, se construyeron ambos sistemas de puesta a tierra diseñados y así poder comparar los valores reales medidos con los valores teóricos calculados. Dicha construcción se llevó a cabo el día martes 18 de julio del 2023 en el mismo terreno del IDIEM señalado anteriormente.

Tanto la construcción de la malla de un electrodo como la malla de cuatro se llevó a cabo con los electrodos planeados durante el diseño, cuyos datos se encuentran en la tabla 4.6. Para la medición de la resistencia de puesta a tierra, se utilizó el mismo DET4TC2 de la marca Megger proporcionado por el DIE.

Para la medición de la resistencia de puesta a tierra de la configuración de un electrodo, se realizaron siete mediciones utilizando el método clásico de medición de tres electrodos, con el electrodo de corriente a 4 metros de distancia de la puesta a tierra. También, se realizaron siete mediciones adicionales utilizando el mismo método, pero con el electrodo de corriente a una distancia de 8 metros. Finalmente, se realizaron cuatro mediciones utilizando una versión alternativa del método clásico, con el electrodo de corriente a 4 metros, desplazando la estaca de potencial en 180 grados de lo habitual. Los métodos de medición de resistencia ocupados son explicados en el anexo de este informe. Los datos relevantes para estas tres mediciones se detallan en las tablas 4.9, 4.10 y 4.11.

Tabla 4.9: Datos relevantes para medición clásica de resistencia con electrodo de corriente separado 4 metros. Malla de un electrodo.

Distancia electrodo de voltaje (m)	Distancia electrodo de corriente (m)	Resistencia medida (Ohm)
0.5	4	135.2
1	4	144.1
1.5	4	150.3
2	4	155.7
2.5	4	161.4
3	4	169.3
3.5	4	184.9

Tabla 4.10: Datos relevantes para medición clásica de resistencia con electrodo de corriente separado 8 metros. Malla de un electrodo.

Distancia electrodo de voltaje (m)	Distancia electrodo de corriente (m)	Resistencia medida (Ohm)
1	8	140.7
2	8	149.8
3	8	154.7
4	8	157.6
5	8	160.5
6	8	164.9
7	8	173.1

Tabla 4.11: Datos relevantes para medición con variación de resistencia con electrodo de corriente separado 4 metros. Malla de un electrodo.

Distancia electrodo de voltaje (m)	Distancia electrodo de corriente (m)	Resistencia medida (Ohm)
2	4	148.8
4	4	152.3
6	4	153.4
8	4	154

En cuanto a la malla compuesta por cuatro electrodos, solo se realizaron cuatro mediciones utilizando la variación del método clásico, manteniendo el electrodo de corriente a 8 metros. Los datos relevantes de estas mediciones se presentan en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Datos relevantes para medición con variación de resistencia con electrodo de corriente separado 8 metros. Malla de cuatro electrodos.

Distancia electrodo de voltaje (m)	Distancia electrodo de corriente (m)	Resistencia medida (Ohm)
8	8	50.5
12	8	51.2
16	8	51.6
20	8	51.8

Capítulo 5

Análisis y discusión

Objetivamente, el punto más importante a analizar de la implementación es si la resistencia teórica obtenida se corresponde con la resistencia real. De ser así, se tendría una mayor confianza en la metodología propuesta, lo que permitiría diseñar los sistemas puesta a tierra simples que las generadoras solares distribuidas necesitan. Para lograr realizar esta comparación se hace necesario obtener las resistencias teóricas y reales de la implementación.

Las resistencias teóricas son directas, ya que son el resultado del uso de la metodología de diseño que culmina con el empleo de las fórmulas simplificadas que arrojan el valor teórico buscado. Estos valores son de 143.12 Ohms en el caso de la configuración de un electrodo y de 48.66 Ohms en el caso de cuatro electrodos, tal como se indica en la tabla 4.8.

En cuanto a las resistencias reales, es necesario analizar los resultados de las mediciones realizadas, que están resumidas en las tablas 4.9, 4.10 y 4.11 para el caso del sistema de un electrodo, y en la tabla 4.12 para el caso de cuatro electrodos.

Analizando los resultados del sistema de cuatro electrodos, se puede estimar con seguridad que la resistencia real es aproximadamente 154 Ohms. Esto se debe a la lectura de las mediciones realizadas con el método variado (tabla 4.11), ya que dicho método se caracteriza por converger a la resistencia real a medida que se aleja el electrodo de voltaje. Este análisis también es respaldado por el método de medición clásico, ya que el valor de 154 Ohms se encuentra en el rango donde este método tiene menor variación en las mediciones a medida que se aleja el electrodo de voltaje. Se puede obtener la misma información de la tabla 4.12 para el caso de cuatro electrodos, es decir, es correcto estimar a partir de esta medición que la resistencia real en esta configuración es de, aproximadamente, 51.8 Ohms.

Comparando los valores teóricos con los valores medidos, se observa un error de 10.88 Ohms en la configuración de un electrodo y de 3.14 Ohms en la configuración de cuatro electrodos. Es de esperar que exista una diferencia entre lo teórico y lo real debido a diferentes factores, principalmente el hecho de utilizar fórmulas simplificadas para el cálculo de resistencia a tierra, lo cual induce un error a considerar. Otras fuentes de error se encuentran en la simplificación del terreno de tres estratos a un estrato, en la posibilidad de que la máquina de medición no esté correctamente calibrada y en el hecho de que el programa IPI2WIN no entregue un terreno estratificado que encaje perfectamente con los datos medidos, sino que exista un leve error, en este caso particular del 3.48 %.

A pesar del error existente, este no es grosero, sino más bien leve. El error relativo en la configuración de un electrodo es del 7.06 %, mientras que el error relativo en la configuración de cuatro electrodos es del 6.06 %, manteniéndose con cierta constancia. Por lo tanto, es posible utilizar la metodología propuesta siempre y cuando se tenga presente este error y se llegue a diseños con una resistencia calculada con una diferencia no menor a 6.5 % respecto a los límites impuestos, por ejemplo.

Con el fin de resumir el análisis anterior se ha generado la tabla 5.1 que muestra los valores reales, teóricos, y los errores absolutos y relativos de la configuración de un electrodo y la configuración de cuatro electrodos.

Tabla 5.1: Tabla resumen del análisis entre valores reales y teóricos de la implementación.

	Un electrodo	Cuatro electrodos
Resistencia real (Ω)	154	51,8
Resistencia teórica (Ω)	143,12	48,66
Error absoluto (Ω)	10,88	3,14
Error relativo	7,06 %	6,06 %

Es importante notar que en la prueba empírica realizada, tanto el valor teórico de la configuración de un electrodo como el valor teórico de la configuración de cuatro electrodos quedaron por debajo del valor medido respectivamente. Es decir, la metodología tiende a subestimar el valor, y por ello, a la hora de diseñar, es necesario tener presente que el valor real de la resistencia a tierra será mayor al calculado (considerando los errores relativos ya señalados).

Para un análisis y discusión más detallados, es importante evaluar cada paso de la implementación realizada. La medición de resistividad del terreno fue un proceso ágil, con una duración de no más de 40 minutos y arrojó resultados aparentemente correctos. Esto se evidencia en la curva mostrada en la figura 4.1 y los datos de la tabla 4.1, donde no se observan valores fuera del patrón esperado ni valores erróneos. Además, si se considera el hecho de que el terreno presento lluvias en la semana anterior a la medición precedida de semanas prolongadas de sequía, se podría corroborar una adquisición exitosa de los datos. Esto ya que el gráfico 4.1 demuestra bajas resistividades contra menor penetración de la corriente (terreno húmedo) y altas resistividades contra mayor penetración de la corriente (terreno seco).

Por otro lado, las resistividades calculadas muestran una variabilidad, lo que sugiere que el terreno no corresponde a un solo estrato, sino a uno con múltiples estratos, que es lo más habitual. Una de las tareas más difíciles en la realización de este paso fue el uso adecuado del equipo de medición, el cual contaba con varias opciones. Dado que tanto este paso como el manejo del equipo son nuevos para las empresas a las cuales va dirigida esta metodología, es importante que conozcan el correcto funcionamiento del equipo antes de llevarlo al terreno.

El segundo paso, que consiste en recopilar datos del sistema solar, tuvo una implementación trivial. Sin embargo, en este caso particular, se encontró una dificultad mayor al necesitar

realizar una búsqueda para obtener una corriente de operación realista con la cual trabajar al no contar con un sistema solar distribuido en terreno. Es importante mencionar que en el diseño de puestas a tierra reales, no debería ser necesario suponer este dato, ya que es un valor objetivo y debería estar disponible para el diseñador desde un principio.

La metodología presentada consta de siete pasos, y se espera que estos pasos tengan una dificultad similar. Sin embargo, en este caso, el segundo paso resultó ser más sencillo que el paso anterior, lo que plantea la pregunta de si es conveniente dejar esta etapa como un paso adicional o si es posible eliminar esta etapa y agregar sus necesidades en pasos posteriores.

Una opción para mejorar la metodología podría ser incluir en pasos posteriores la obtención de la corriente de operación del sistema solar, eliminando así este paso como un paso independiente. De esta manera, se podría integrar esta información directamente en el análisis y diseño del sistema de puesta a tierra, evitando complicaciones innecesarias y asegurando que los datos más relevantes estén disponibles desde el inicio del proceso. Esto podría simplificar y agilizar la metodología sin perder precisión en el diseño final.

La implementación del tercer paso, que consiste en establecer la resistencia límite, sigue la lógica del segundo paso en cuanto a dificultad. La complejidad de este paso radica en una simple división de dos números, lo cual resulta sencillo en la gran mayoría de los casos, especialmente teniendo en cuenta la tecnología actual.

En cuanto a la decisión de guiarse por la resistencia aceptada por la SEC o por la resistencia límite calculada, esta elección debería ser relativamente sencilla y guiada por los lineamientos de las empresas y el proyecto a proteger. En la mayoría de los casos, la resistencia aceptada por la SEC será más fácil de cumplir debido a que tiende a ser un valor más elevado que la resistencia calculada y por ende, es un límite más atractivo si lo que se busca es cumplir con la normativa. Aun así, elegir el límite calculado puede llegar a ser atractivo para las empresas, en especial aquellas comprometidas con la seguridad.

Por otro lado, la resistencia calculada necesita utilizar directamente los datos obtenidos en el paso anterior, lo cual hace más atractivo juntar ambos pasos en uno solo. De esta manera, se pueden eliminar pasos triviales y reducir el número total de pasos, lo que vuelve la metodología más simple y fácil de seguir.

El cuarto paso vuelve a introducir una mecánica nueva para las empresas que deseen seguir esta metodología, ya que involucra analizar los datos obtenidos en terreno para determinar la cantidad de estratos presentes y la resistividad de cada uno de ellos. Esto nuevamente añade dificultad al proceso de diseño. Afortunadamente, el programa IPI2WIN permite una rápida transformación de los datos medidos, lo que facilita este análisis.

La dificultad finalmente recae en decidir hasta qué punto se debe evaluar la posibilidad de agregar un nuevo estrato al modelo. Agregar un nuevo estrato sin duda reducirá el error entre el modelo entregado por IPI2WIN y las mediciones tomadas en terreno, ya que el nuevo estrato permitirá una mayor flexibilidad para adaptar el modelo a las mediciones reales. Sin embargo, a medida que se agregan más estratos, aumentará la dificultad de pasos posteriores, específicamente el cálculo de un terreno equivalente.

No es fácil discernir si la reducción del error compensa la dificultad posterior de cálculo, y parece ser una decisión más basada en la experiencia que en cualquier otra cosa. Es importante considerar que la inclusión de un mayor número de estratos puede mejorar la precisión del modelo, pero también puede incrementar la complejidad y los recursos necesarios para el diseño. Por tanto, es crucial evaluar cada caso en particular y determinar si el beneficio obtenido justifica la complejidad adicional en el proceso de diseño.

En el caso concreto de esta implementación, se decidió utilizar un modelo de tres capas debido a que el gráfico 4.1 y la experiencia previa apuntaban hacia esa dirección (o al menos sugerían un terreno con más de dos estratos). Además, el error del 3.48 % proporcionado por IPI2WIN permitió tomar esa decisión y detenerse en un terreno de tres estratos.

Bajo esa lógica, sería conveniente establecer un límite de error en IPI2WIN, por ejemplo, un error máximo del 5 %, bajo el cual el terreno se consideraría aceptable. Sin embargo, es necesario mencionar que un análisis posterior mostró que, en este caso concreto, un terreno de cuatro estratos proporcionado por IPI2WIN tenía un error de solo el 1.21 %, lo cual pudo haber llevado a resultados teóricos más cercanos a los resultados reales.

Esto demuestra que la elección del número de estratos y el límite de error de IPI2WIN puede tener un impacto significativo en la precisión del diseño. Es importante considerar que cada caso es único y que tomar decisiones basadas en la experiencia, los datos disponibles y los resultados analizados es fundamental para lograr resultados más precisos y confiables en el diseño de sistemas de puesta a tierra.

En cuanto al quinto paso, para efectos de esta implementación concreta, resultó ser trivial, ya que la elección de un solo electrodo enterrado verticalmente fue simplemente para comprobar que la metodología es adecuada para el tipo de puesta a tierra más utilizado por las empresas de instalación de generación solar distribuida. De manera similar, la elección de un sistema de cuatro electrodos siguió un patrón similar; se buscaba verificar que la metodología funcionara para un diseño simple.

Sin embargo, no es posible afirmar concretamente que este paso siempre sea fácil. Aunque en la mayoría de los casos se elige un diseño de electrodo vertical, puede ser que la experiencia dictamine otro enfoque y, por ende, es necesario tomarse el tiempo para elegir una geometría que se adapte a las necesidades específicas del proyecto.

Cada proyecto puede presentar diferentes requisitos y desafíos, lo que puede influir en la elección de la geometría y la configuración del sistema de puesta a tierra. Por lo tanto, es fundamental considerar las características únicas de cada proyecto y tomar decisiones fundamentadas para asegurar que la metodología se adapte de manera óptima a las circunstancias particulares del diseño.

El sexto paso, al ser aplicado por primera vez, puede presentar cierta dificultad. La decisión de reducir el terreno a uno o dos estratos fue sencilla en este caso particular, ya que se utilizaron las fórmulas presentes en el marco teórico de este informe, las cuales son aplicables en terrenos de un solo estrato. Sin embargo, es importante recordar que estas no son todas

las fórmulas existentes, y puede haber algunas que no estén especificadas aquí pero que se deseen ocupar en el caso de terrenos de dos estratos.

Por otro lado, emplear el método de Yakobs para la reducción de los estratos por primera vez, implica un desafío, ya que es necesario calcular correctamente todos los parámetros involucrados en la fórmula. Sin embargo, a medida que se va adquiriendo experiencia con el método, este se vuelve cada vez más sencillo, ya que las mismas fórmulas pueden ser reutilizadas en futuros diseños. En este sentido, es conveniente guardar las operaciones realizadas en una Hoja de Cálculo para poder reutilizarlas o sobrescribirlas en el futuro.

La reutilización de cálculos y la posibilidad de tener una referencia de diseños previos en una Hoja de Cálculo puede ayudar a agilizar y simplificar el proceso de diseño, ya que se evita tener que calcular nuevamente todos los parámetros desde cero en cada nueva implementación o de definir nuevamente las fórmulas. Así, se puede aprovechar la experiencia acumulada para mejorar la eficiencia y la precisión en el diseño de sistemas de puesta a tierra en terrenos de múltiples estratos.

El último paso de la metodología sigue la lógica del paso anterior, ya que al principio puede ser difícil de implementar, pero a medida que se utiliza más veces, se vuelve más sencillo. Esto se debe a que nuevamente se deben aplicar fórmulas para calcular la resistencia de puesta a tierra teórica, y algunas de estas fórmulas pueden tener varios componentes, lo que requiere cuidado al definir las.

Sin embargo, una vez que se ha definido correctamente la fórmula para una configuración específica, es posible reutilizarla en futuras iteraciones, modificando solo los argumentos necesarios. Por lo tanto, almacenar estas fórmulas en una hoja de cálculo resulta conveniente y práctico.

En cuanto a la implementación realizada, fue conveniente realizar la comparación de las resistencias teóricas con los límites impuestos (figura 4.2) ya que, desde el diseño, se advirtió que las dos configuraciones propuestas no cumplían con la normativa requerida. En caso de haber sido un proyecto real, este paso habría marcado una alerta y no se habría procedido con el armado de la puesta a tierra. En su lugar, se habría tenido que recurrir a un rediseño del sistema para evitar pérdidas de tiempo y recursos monetarios en terreno.

Este paso es crucial para asegurar que el diseño cumpla con los requisitos normativos y garantizar la seguridad y eficiencia del sistema de puesta a tierra. Al llevar a cabo esta comparación y detectar posibles incumplimientos de los límites establecidos, se pueden tomar medidas correctivas a tiempo y garantizar que el sistema esté correctamente diseñado y cumpla con los estándares de seguridad requeridos.

Es alentador que la implementación de la metodología haya sido bastante rápida, con un total de aproximadamente una hora de trabajo, considerando tanto el tiempo en terreno como el tiempo de diseño. Si bien puede parecer un tiempo considerable, sobre todo si se consideran múltiples proyectos solares que una empresa del área maneja, es importante tener en cuenta que este tiempo tiende a disminuir a medida que se adquiere más experiencia y se utilizan y guardan las fórmulas empleadas en pasos anteriores.

La familiaridad con la metodología, el uso de hojas de cálculo para almacenar y reutilizar fórmulas, así como la experiencia previa con el equipo y el programa IPI2WIN, son factores que pueden contribuir significativamente a la agilidad y eficiencia del proceso. A medida que se realizan más proyectos y se enfrentan diferentes escenarios, se acumula un conocimiento valioso que puede ser aplicado en futuras implementaciones, acelerando el proceso y reduciendo el tiempo empleado.

Es esencial seguir mejorando y perfeccionando la metodología para optimizar aún más el tiempo de trabajo y asegurar resultados precisos y confiables en el diseño de sistemas de puesta a tierra para proyectos solares distribuidos. La búsqueda constante de eficiencia y la aplicación de buenas prácticas ayudarán a lograr un proceso más ágil y efectivo en futuras implementaciones.

Si bien la implementación de la metodología buscaba validar simplemente el diseño con un caso de estudio real, surge la duda de cuál hubiera sido un diseño de puesta a tierra simple que cumpliera con los requisitos de la SEC. Utilizando los mismos electrodos propuestos de 0.5 metros (enterrados en su totalidad) y la fórmula 2.21, se puede encontrar que se necesitan entre 12 y 16 electrodos enterrados verticalmente, con una resistencia teórica entre 19.28 y 15.42 Ohms y, considerando un error del 6.5 %, una resistencia final entre 20.62 y 16.49 Ohms.

Si se utilizaran electrodos más largos, de 1.5 metros, por ejemplo, se necesitarían entre 4 y 8 electrodos, con una resistencia final, con error de 6.5 % incorporado, entre 24.8 y 15.31 Ohms. Si la idea es ocupar un solo electrodo enterrado verticalmente, este tendría que ser de 19.5 metros para obtener una resistencia final, con un error del 6.5 % incorporado, de 19.94 Ohms. Sin embargo, es importante destacar que la viabilidad práctica de electrodos de tales dimensiones resulta poco factible. Todas estas soluciones factibles se encuentran resumidas en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Resumen de posibles soluciones al terreno utilizado.

Solución	Resistencia teórica	Resistencia final (Con error de 6,5 %)
Entre 12 y 16 electrodos de 0,5 metros	Entre 19,28 y 15,42 Ohms	Entre 20,62 y 16,49 Ohms
Entre 4 y 8 electrodos de 1,5 metros	Entre 23,19 y 14,32 Ohms	Entre 24,8 y 15,31 Ohms
Un electrodo de 19,5 metros	18,65 Ohms	19,94 Ohms

Es interesante señalar que las anteriores soluciones propuestas y resumidas en la tabla 5.2 no son las únicas. En efecto, se pudieron ocupar geometrías un tanto más rebuscadas y señaladas en el Estándar 142 de la IEEE [8] u otras alternativas, como el uso de electrodos químicos que corresponden a electrodos rellenos con sales solubles que disminuyen la resistencia a tierra una vez enterrados o el uso de la incorporación de aditivos en el terreno que mejoren la conductividad y disminuyan la resistencia. Aun así, es necesario entender que

estas dos últimas alternativas conllevan mayores gastos, en especial el electrodo químico, y pueden no ser atractivas para las empresas de generación distribuida.

El análisis anterior, sobre la cantidad de electrodos necesarios para alcanzar la resistencia límite impuesta por la SEC, abre el debate a la siguiente pregunta: ¿Cómo es posible que en la vasta mayoría de proyectos solares distribuidos, las empresas utilicen un solo electrodo enterrado verticalmente para alcanzar la cota determinada por la SEC, mientras que en la implementación de esta metodología, en el primer terreno implementado, se necesiten al menos 4 electrodos comerciales de 1.5 metros para apenas rozar los 20 Ohms?

La pregunta anterior se puede contestar de al menos tres maneras distintas: Primero, que el terreno de implementación en Cerrillos sea un mal terreno, eléctricamente hablando. Segundo: Que exista un problema asociado a las empresas que prestan el servicio. Tercero: Que exista un problema asociado con la SEC.

El primer planteamiento es factible; después de todo, la metodología se implementó solamente en un solo terreno en el cual se puede dar la casualidad de que no sea adecuado para sistemas de puesta a tierra. Aun así, llama la atención que se necesiten entre cuatro y ocho electrodos comerciales o un electrodo ficticio de 19.5 metros para obtener los mismos resultados que las empresas.

La segunda opción es perfectamente planteable. Es posible que las empresas, debido a su desconocimiento en el uso de los equipos asociados, los utilicen mal y midan la resistencia de puesta a tierra de manera equivocada o realicen una sola medición con estos equipos, con el electrodo de voltaje muy cercano a la puesta a tierra, cuya medición será baja. Por otro lado, se podría argumentar que las empresas adulteran los datos enviados a la SEC con el fin de ejecutar estas instalaciones de un solo electrodo. Sin embargo, esta acusación carece de fundamentos sólidos y se requeriría de una investigación más a fondo en el tema para respaldarla.

La tercera opción es igualmente viable. A pesar de que la SEC es una institución con profesionales capacitados, es comprensible que ocasionalmente se aprueben proyectos con aspectos que no cumplen con las normativas debido a errores o que algunos proyectos no sean visitados debido a la cantidad limitada de personal de la SEC. Esta línea de pensamiento cobra relevancia si se tiene en cuenta el considerable aumento de la generación distribuida en el país en los últimos años. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, esta hipótesis requiere argumentos y/o evidencia para respaldarla.

La comprobación del primer caso no es difícil; basta con aplicar la metodología de diseño en un par más de terrenos distintos para comprobar si un electrodo es útil o no para estos propósitos. En caso de descartar un problema con el terreno aquí ocupado, significaría que puede existir un problema con las empresas mencionadas o con la SEC, problema de gran magnitud ya que involucra la seguridad de cientos de personas. En tal caso, habría que comprobar realmente los sistemas de puesta a tierra de sistemas solares distribuidos ya instalados y realizar la investigación correspondiente.

Capítulo 6

Conclusiones

En esta memoria de título, se presentó una metodología que permite diseñar sistemas de puesta a tierra para generadoras fotovoltaicas conectadas a la red de distribución. El principal atractivo de esta metodología es que es simple, constando solo de 7 pasos y que permite diseñar sistemas de puesta a tierra sencillos, que son los que se utilizan generalmente en este tipo de proyectos solares debido a su baja potencia. El principal motivo para generar una metodología sencilla es facilitar el uso para las empresas a las cuales está dedicada esta metodología. Actualmente, estas empresas utilizan, en la mayoría de proyectos, el sistema de puesta a tierra más sencillo: un electrodo enterrado verticalmente. Debido a la cantidad de proyectos que manejan estas empresas al mes, no se pueden permitir incorporar metodologías complejas a su operación debido al costo temporal que esto supondría.

La metodología propuesta se relaciona directamente con los objetivos presentes en la introducción de este documento. Hay que tener presente que el objetivo general era proponer una metodología para el diseño de puesta a tierra en sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución, lo cual se cumple. En cuanto a los objetivos específicos, esta metodología cumple con dar a entender de manera general los métodos de puesta a tierra disponibles, así como las normas chilenas involucradas, fórmulas relacionadas al diseño, reglamentos y/o recomendaciones tanto a nivel nacional como internacional. Además, para el correcto uso de esta metodología, se dio a entender cómo ciertos programas computacionales, como IPI2WIN u hojas de cálculo, permiten un uso rápido de la metodología, cumpliendo así con el segundo objetivo específico. En cuanto al tercer objetivo específico, la metodología se logró validar mediante un caso de estudio en terreno, ubicado en la Comuna de Cerrillos, perteneciente al IDIEM.

La relevancia de esta propuesta radica en la seguridad que los clientes finales obtendrán, así como en el ahorro de recursos que las empresas de generación distribuida obtendrán. Actualmente, estas empresas utilizan una solución sencilla e igual para todos sus proyectos, encontrándose en algunos casos con problemas normativos y teniendo que recurrir a una inversión extra de dinero y tiempo para solucionarlos. En el caso de que estas empresas adopten esta metodología o una adaptación similar, se eliminarían estos contratiempos esporádicos. Además, en el caso de que dichas empresas diseñen todos sus sistemas de puesta a tierra, los clientes finales obtendrían una mayor seguridad al recibir diseños pensados para las características de su terreno.

Es necesario aclarar que el estudio y validación de esta metodología fue limitado. Al implementar el caso de estudio sin una empresa de por medio, los recursos fueron más limitados de lo habitual. Por lo mismo, solo pudo realizarse una implementación en terreno, en contraste con las dos o tres que se esperaban. Además, durante la implementación en terreno, solo pudieron comprobarse dos geometrías y, por ende, no todas las fórmulas proporcionadas en el marco teórico han sido comprobadas.

Por lo mismo, como trabajo a futuro, se recomienda trabajar con una empresa dedicada al área en cuestión para poder abordar más terrenos y geometrías, con el fin de validar todos los aspectos y fórmulas propuestas. De esta manera, se tendría mayor seguridad de qué fórmulas se pueden ocupar y cuáles no, además de conocer el error asociado a ellas, con el fin de evitar sobrestimar o subestimar los valores reales. Con este aumento en el número de muestras, podría ser posible presentar la metodología frente a la SEC y, en un trabajo en conjunto, instar u obligar a las empresas a seguir este conducto de diseño o una variación del mismo.

Por otro lado, durante el análisis surgió una duda de suma importancia, ya que podría afectar la seguridad de cientos de personas. Esto se debe a que, si se descarta un problema con la metodología propuesta, podrían existir problemas relacionados con las empresas que diseñan e instalan los sistemas solares distribuidos y/o con la calidad de los trabajos realizados por la SEC. El seguimiento, fiscalización y resolución de estos problemas podrían dar lugar a una continuación del trabajo realizado o incluso inspirar trabajos independientes en el futuro.

En conclusión, se ha demostrado mediante un caso práctico que la metodología propuesta funciona y sirve para diseñar sistemas de puesta a tierra sencillos dentro de las normas actualmente establecidas de manera rápida. El uso continuo de esta metodología por parte de las empresas facilitaría aún más su rapidez de uso al ir formando una base de datos de fórmulas recurrentemente utilizadas, lo que les permitiría ahorrar recursos económicos a largo plazo al evitar inconvenientes asociados a la subsanación de problemas relacionados con la puesta a tierra.

Bibliografía

- [1] Gobierno de Chile, “Energía 2050: Política Energética de Chile”, Ministerio de Energía, 2022.
- [2] “Ley 20.571, REGULA EL PAGO DE LAS TARIFAS ELÉCTRICAS DE LAS GENERADORAS RESIDENCIALES” Diario Oficial, Número 40.952, 6 de septiembre de 2014.
- [3] IEEE Std 80-2000 (Revisión of IEEE Std 80-1986), “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2000.
- [4] Pliego Técnico Normativo RIC N°06, “Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial”, RIC N°06, 2020.
- [5] C.F. Dalziel : “Electric shock hazard”. IEEE Spectrum, February, 1972.
- [6] Pliego Técnico Normativo RIC N°05, “Medidas de Protección Contra Tensiones Peligrosas y Descargas Eléctricas”, RIC N°05, 2020.
- [7] Yakobs, A. I., “Reduction of multi-layer electric structures of earth to two-layer structure equivalent in designing complex earthing systems”, Electric Technology in USSR, No. 8, 1970, pp. 19-23.
- [8] IEEE Std 142™-2007 (Revisión de IEEE Std 142-1991), “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, 2007.
- [9] N. E. Sepúlveda, “Diseño eficiente de malla de tierra en parques fotovoltaicos de grandes dimensiones”, Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2021.
- [10] F. J. Sweet, “Software para la determinación de configuración geoelectrica y análisis de mallas de tierra en terrenos estratificados”, Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2015.
- [11] Instrucción Técnica RGR N°02/2020, “Diseño y Ejecución de las Instalaciones Fotovoltaicas Conectadas a Redes de Distribución”, N°02/2020, 2020.

Anexos

Anexo A. Medición de resistencia de puesta a tierra

La medición de la resistencia de puesta a tierra es un apartado que no está dentro de los límites de esta memoria, ya que esta medición se realiza cuando el sistema de puesta a tierra ya está instalado, mientras que esta memoria se enfoca en el diseño del sistema, previa instalación. Sin embargo, debido a que durante la implementación para validar la metodología se realizó una medición de resistencia de puesta a tierra mediante dos métodos, se hace necesario explicarlos con el fin de dar a entender mejor el proceso. A continuación, entonces, se explica el método clásico de medición de resistencia de puesta a tierra con 3 electrodos y la variación de este método utilizada.

A.1. Método clásico de medición de tres electrodos

Los métodos de medición consisten en inyectar en la puesta a tierra una corriente alterna con la ayuda de un electrodo auxiliar de corriente, ubicado en la tierra remota práctica, a una distancia suficientemente alejada para que la resistencia mutua entre el electrodo auxiliar y la puesta a tierra sea nula. Luego, con la ayuda de un electrodo auxiliar de potencial móvil, se mide la diferencia de potencial entre este y la puesta a tierra, deduciendo así el valor de la resistencia a tierra mediante la fórmula A.1 en donde x es la distancia entre la puesta a tierra y el electrodo de potencial, V_{pt} es el voltaje de puesta a tierra, $V_{auxiliar}$ es el voltaje del electrodo de potencial auxiliar e I es la corriente inyectada por el electrodo de corriente. Debido a que el método utiliza activamente los dos electrodos auxiliares (corriente y potencial) y la puesta a tierra, es que se le denomina “de tres electrodos”.

$$R(x) = \frac{V(x)}{I} = \frac{V_{pt} - V_{auxiliar}(x)}{I} \quad (A.1)$$

El método clásico busca realizar múltiples mediciones de resistencia al ir moviendo el electrodo de potencial entre la puesta a tierra y el electrodo de corriente. Mientras el electrodo de potencial esté cercano a la puesta a tierra, la resistencia medida será baja, ya que la diferencia de potencial medida es pequeña. A medida que el electrodo de potencial se acerque al electrodo de corriente, la resistencia medida será alta debido a la influencia del electrodo de corriente. En ambos casos (cercano a la influencia de la puesta a tierra o cercano a la influencia del electrodo de corriente), es difícil determinar cuál es la resistencia de la puesta a tierra debido a la variabilidad de los datos medidos. Aun así, si el electrodo de corriente está lo suficientemente alejado, debiese existir una zona entre dicho electrodo y la puesta a tierra donde no exista influencia de estos. Es decir, debiese existir una distancia X' en donde

$V_{auxiliar}(X') = 0$ y por consiguiente, la resistencia medida corresponde a la resistencia de puesta a tierra.

El movimiento del electrodo de potencial en este método se ejemplifica en la figura A.1. La figura representa una vista de planta de un terreno en donde se realizan cuatro mediciones, la posición V1 corresponde a la posición del electrodo de potencial en la primera medición, la posición V2 corresponde a la posición del electrodo de potencial en la segunda medición y así sucesivamente. El círculo P.T. representa la puesta a tierra, mientras que el círculo I representa el electrodo de corriente.

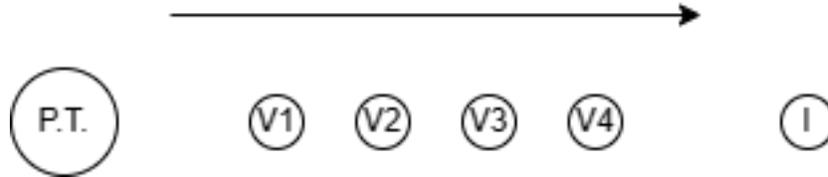


Figura A.1: Movimiento del electrodo de potencial para el método clásico de medición.

La necesidad de realizar diferentes mediciones recae en que la distancia X' no es conocida de antemano. Por ello, la medición de varios datos, aumentando la distancia x desde la puesta a tierra hasta el electrodo de corriente, permite descifrar de mejor manera la resistencia de puesta a tierra, debido a que los datos medidos siguen siempre el mismo patrón.

Las mediciones de resistencia con el electrodo de potencial cercano a la puesta a tierra arrojarán valores bajos. A medida que el electrodo de potencial se aleje de la puesta a tierra, las mediciones de resistencia aumentarán notablemente. Cuando el electrodo de potencial llegue a las cercanías de la distancia X' , las variaciones en la medición de resistencia serán menos notables. Cuando el electrodo de potencial comience a alejarse de las cercanías de X' , las mediciones de resistencia retomarán un aumento notable. Por ende, el valor buscado de la resistencia de puesta a tierra corresponde a los valores en las mediciones donde la variación es menor. Si se cuenta con varios datos, es posible graficar la resistencia medida en función de la distancia del electrodo de potencial, obteniendo un gráfico parecido al símbolo de integración (\int) pero acostado e invertido. En dicho gráfico, los valores de resistencia buscados se encuentran en la parte llana.

A.2. Variación del método clásico de medición de tres electrodos

Existe un pequeño cambio que se puede realizar al método clásico de medición de tres electrodos con el fin de simplificar el análisis de las mediciones, ya que, con este cambio, a medida que se aleja el electrodo de potencial, el valor medido de resistencia se limitará con la resistencia buscada, evitando así la necesidad de comparar las variaciones de resistencia en las distintas mediciones.

El cambio consiste en que, en vez de mover el electrodo de potencial desde la malla hacia el electrodo de corriente, se mueva desde la malla alejándose, a su vez, del electrodo de corriente. Es decir, moverlo en una dirección desde 90° hasta 270° , preferiblemente en 180° , en

dirección contraria al electrodo de corriente.

De esta manera, el electrodo de potencial se alejará de la influencia de la malla a tierra y nunca entrará en la influencia del electrodo de corriente. Por ello, las resistencias observadas serán pequeñas si el electrodo de potencial se encuentra cercano a la puesta a tierra, y aumentarán a medida que este se aleje. Sin embargo, mientras más se aleje el electrodo de potencial, la variación en las mediciones comenzará a decrecer, llegando, en el límite, a la resistencia buscada.

La ilustración de la figura A.2 muestra cómo se desplaza el electrodo de potencial en este método. La representación gráfica ofrece una perspectiva aérea de un área en la que se llevan a cabo cuatro tomas de medida. La ubicación V1 denota dónde se posicionó el electrodo en la primera medición, la ubicación V2 señala su posición en la segunda medición, y así sucesivamente. Dentro del esquema, el círculo etiquetado como P.T. simboliza la puesta a tierra, en tanto que el círculo marcado como I indica la ubicación del electrodo de corriente.



Figura A.2: Movimiento del electrodo de potencial para el método variado de medición.