

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Eléctrica



Comparación de los métodos de medición de resistencia
de puesta a tierra de líneas de transmisión y
verificación con pruebas experimentales

Opta al título de Ingeniero Electricista:

Sr. Leandro Castillo Michea

Profesores patrocinadores:

Dr. Johny Montaña Chaparro

Valparaíso, Chile
Diciembre - 2024

Agradecimientos

Quiero dar las gracias y dedicar este trabajo a todas las personas que me acompañaron en esta travesía la cual a sido mi sueño de toda la vida.

En primer lugar, quiero agradecer a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica, con quienes compartí unos hermosos y difíciles años universitarios. A Maximiliano Vargas, por ser el amigo y compañero que me ha apoyado en todo este proceso, a Maximiliano Carvajal que con su simpatía se convirtió en mi primer amigo de la carrera, a mis amigos de plan común Joaquin Hernandez y Fernando Donoso con los cuales compartí momentos memorables. También quiero agradecer a Cristián Andrades, Claudio Ramos y Cristián Videla Por toda su amabilidad y apoyo en todo el proceso de mi carrera, contar con el apoyo de ustedes fue de suma importancia para desarrollar esta memoria. A mis compañeros y futuros colegas del Área de alta Tensión Francisco Oyarzo, Alvaro Bozo y Emilio, también agradecer a todo mis compañeros de carrera Rodrigo Lobos, Camila, Anais, Christhopher, Guillermo quienes siempre me apoyaron y me integraron y fueron una motivación en todo este proceso, agradecer también a mis amigos de Combarbalá Diego, Alex, Vicente, Isaac, Fabián y Daniel, por siempre estar ahí para alegrarme y apoyarme cuando mas lo necesitaba, también agradecer a Lucas por guiarme en mi primer año en la universidad, a Katalina por todo el apoyo y motivación que me brindo en todos estos años y a don Alex Muñoz por ser un colega y un amigo incondicional.

También agradecer a los profesores los cuales marcaron y fueron mi motivación para no rendirme en todo este desafío, al profesor Javier Rios por brindarme su confianza y apoyo en los inicios de mi carrera, Al profesor Esteban Pulido por todo su apoyo tanto en lo académico como en lo personal, al profesor Juan Navarrete por toda su buena voluntad al apoyarme tanto en lo académico como en lo profesional y finalmente a mi profesor guía Johny Montaña, con el cual tuve la oportunidad de compartir todo este proceso del desarrollo de mi tema de memoria, muchas gracias por siempre apoyarme, aconsejarme y ser un modelo a seguir tanto académicamente como personalmente.

Finalmente agradecer a mi familia, a mi padre por el apoyo brindado todos estos años, a mi madre y mis hermanos Diego y Harold que son lo más preciado que tengo en esta vida.

Índice general

Agradecimientos	I
Lista de figuras	V
Lista de tablas	VI
1 Introducción	2
1.1 Objetivos	4
2 Marco Teórico	5
2.1 Puesta a tierra	5
2.2 Resistividad del suelo	5
2.2.1 Método Wenner de cuatro electrodos	6
2.3 Puesta a tierra en torres de transmisión	7
2.4 Generación de tensión tipo impulso	8
2.5 Modelamiento de sistemas de puesta a tierra mediante el Modelo electromagnético híbrido	10
2.5.1 Calculo de resistencia de puesta a tierra mediante software UN_PAT	10
2.6 Métodos de medición de resistencia de puesta a tierra	12
2.6.1 Método de caída de potencial	12
2.6.2 Método de inyección de corriente de alta frecuencia 25[kHz]	13
2.6.3 Método basado en la carga neta drenada mediante excitación tipo impulso	14
3 Métodos seleccionados y experimentación previa	16
3.1 Simulación y verificación del método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada	17
3.2 Verificación experimental del método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada	19
3.3 Desarrollo experimental previo basado en la utilización de telurómetros .	23
4 Resultados y análisis	26
4.1 Descripción de la torre de transmisión seleccionada	27
4.1.1 Mediciones de resistividad del terreno	28
4.1.2 Dispositivo de puesta a tierra de la torre	29
4.2 Resultados y análisis mediante la utilización de telurómetros basados en el método de caída de potencial	29
4.2.1 Procedimientos de medición	29
4.2.2 Resultados de mediciones de resistencia de puesta a tierra mediante telurómetros en torre de transmisión	31

4.2.3	Análisis de resultados	32
4.3	Resultados mediante método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada	32
4.3.1	Procedimiento experimental	32
4.3.2	Resultados de mediciones en torre de transmisión con cable de guarda conectado.	34
4.3.3	Resultados de mediciones en torre de transmisión con cable de guarda desconectado	35
4.3.4	Análisis de resultados	36
5	Desarrollo computacional para el modelado de torre de transmisión y calculo de resistencia de puesta a tierra	37
5.1	Resultado computacional mediante software UN_PAT	38
5.2	Modelo del circuito equivalente de una torre de transmisión	39
5.2.1	Modelado de los electrodos de la torre de transmisión	39
5.2.2	Modelo de la estructura de la torre de transmisión	40
6	Comparación teórico-experimental	44
6.1	Implementación modelo de la torre en ATP	44
6.2	Comparación teórico experimental de los métodos aplicados	45
7	Conclusiones	48
	Anexos	53
	Instrumentación utilizada	54

Índice de figuras

Figura1	Estructura de multicapas horizontales para modelamiento del suelo [9].	6
Figura2	Disposición de cuatro electrodos mediante método de Wenner. Elaboración propia	7
Figura3	Esquemas básicos de generador de impulsos de una etapa [19] . . .	9
Figura4	Acoples longitudinales y transversales entre segmento emisor j y receptor i [6].	11
Figura5	Esquema de medición mediante método de caída de potencial. Elaboración propia.	13
Figura6	Resistencia de puesta a tierra versus distancia [21]	13
Figura7	Circuito basico de carga neta [5]	14
Figura8	circuito mejorado de carga neta [5]	15
Figura9	Circuito de medición de carga neta drenada implementado en ATP DRAW. Elaboración propia.	17
Figura10	Mediciones del circuito implementado en ATP	18
Figura11	: Generador de impulsos móvil	19
Figura12	: Esquema del circuito del generador de impulsos. Elaboración propia.	19
Figura13	Diagrama circuito de medición de resistencia de puesta a tierra usando el método de carga neta drenada. Elaboración propia.	21
Figura14	Mediciones de corriente para puestas a tierra simples	21
Figura15	Mediciones de resistencia Ra y Rx	22
Figura16	Telurómetros a utilizar.	23
Figura17	Esquema de medición implementado. Elaboración propia.	24
Figura18	Gráfico de caída de potencial para telurómetros de alta y baja frecuencia	24
Figura19	Torre de transmisión PAS-27 La Pólvora – Agua Santa 220 [kV]	27
Figura20	Curva de resistividad obtenida	28
Figura21	Disposición del dispositivo de puesta a tierra. Elaboración propia	29
Figura22	Diagrama de medición de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión mediante la utilización de telurómetros. Elaboración propia.	30
Figura23	Vista aérea del eje de medición realizado	30
Figura24	Mediciones de resistencia de puesta a tierra en torres con y sin cable de guarda conectado para diferentes frecuencias.	31
Figura25	Diagrama de medición de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión mediante método basado en la carga neta drenada. Elaboración propia.	33
Figura26	Mediciones de corriente para torre con cable de guarda conectado	34
Figura27	Mediciones de corriente para torre sin cable de guarda conectado.	35

Figura28	Mediciones de corriente para torre con cable de guarda conectado.	36
Figura29	Configuración del sistema de puesta a tierra en UN_PAT	38
Figura30	Resultado computacional obtenido para simulación de contrapeso de 9.5[m] y barra vertical de 3 [m].	39
Figura31	Resultado computacional obtenido para simulación de barra vertical de 3 [m].	40
Figura32	Modelo pies de la torre y estructura. Elaboración propia	42
Figura33	Modelo final torre de transmisión. Elaboración propia	42
Figura34	Modelo de la torre implementado en ATP. Elaboración propia	44
Figura35	Telurómetro AEMC y adaptador GroundFlex [30]	46
Figura36	Sonda de corriente Pearson 150	54
Figura37	Osciloscopio Tektronix 3014	54
Figura38	KEITHLEY 247 High Voltage Supply	55
Figura39	MEGABRAS EM4058	55
Figura40	MEGABRAS TM25R	56
Figura41	Generador de impulsos móvil	56

Índice de tablas

Tabla1	Requisitos de valores de resistencia a tierra de una torre con cable de tierra aéreo conectado [16].	8
Tabla2	Parámetros aproximados para Esquemas de generación de impulso [19]	9
Tabla3	Resultados de la integración trapezoidal para diferentes variables. .	18
Tabla4	Valores utilizados en el circuito de generación de impulso	20
Tabla5	Valores medidos para puestas a tierra simples	21
Tabla6	Resultados mediante carga neta drenada y caída de potencial para barra vertical	22
Tabla7	Resistencia de puesta a tierra para electrodo simple	25
Tabla8	Mediciones resistividad de terreno mediante método de Wenner . .	28
Tabla9	Rango de valores de resistencia de puesta a tierra mediante la utilización de telurómetros	32
Tabla10	Valores medidos para torre conectada con cable de guarda	34
Tabla11	Valores medidos para torre sin cable de guarda	35
Tabla12	Valores R-C paralelo para modelos de electrodos	40
Tabla13	Resumen de parámetros	42
Tabla14	Resumen de valores del modelo de la torre de transmisión equipada con cable de guarda	43
Tabla15	Resultados de resistencia de puesta a tierra para torre de transmisión con cable de guarda conectado	45
Tabla16	Porcentaje de la corriente total inyectada que se distribuye por las torres vecinas.	45
Tabla17	Resultados de resistencia de puesta a tierra para torre de transmisión sin cable de guarda conectado	46
Tabla18	Error porcentual de las mediciones experimentales	47

Resumen

El desarrollo de esta memoria busca contribuir al estado del arte en el área de sistemas de puestas a tierra, Presentando resultados tanto teóricos como experimentales para el valor de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda.

Los objetivos de esta memoria consistieron en realizar mediciones experimentales en torres de transmisión con la finalidad de analizar la precisión de dos telurómetros de distinta frecuencia de operación (270 [Hz] y 25 [kHz]) y, además, implementar y verificar mediante pruebas experimentales una nueva metodología de medición de resistencia de puesta a tierra basada en la carga neta drenada.

Las pruebas experimentales se realizaron en la región de Valparaíso, en la torre de transmisión PAS-27 de la línea de transmisión La Pólvora – Agua Santa de 220 [kV]. Esta torre posee un sistema de puesta a tierra compuesto por dos cables de contrapeso de 9.5 [m] de longitud, ubicados en dos pies de la torre y enterrados a una profundidad de 0.5 [m].

Con base en la información de la geometría de los electrodos de puesta a tierra de la torre de transmisión, se realizó una simulación en un software computacional denominado UN_PAT, obteniéndose un resultado teórico de 6.6 [Ω]. Este valor se consideró como referencia para la comparación de resultados, ya que éste considera la condición de la torre de transmisión desconectada del cable de guarda

Los resultados obtenidos indican que el método basado en la utilización de un telurómetro de alta frecuencia (25 [kHz]) es el que presenta el menor margen de error, con un rango de [4,8; 10,6] [%]. El método de medición mediante un telurómetro de baja frecuencia presentó un margen de error de [72,4; 74,7] [%], mientras que el método basado en la carga neta obtuvo un error del 79,7 [%]. Esto permite concluir que estos dos últimos métodos no son válidos para la medición de la resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda.

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) se definen como un conjunto de elementos conductores en un sistema eléctrico que establecen una conexión sólida y continua entre los equipos eléctricos y el suelo. Estos elementos, incluyen cables, electrodos y estructuras específicas. Un SPT es una parte esencial dentro de un sistema eléctrico, especialmente en los sistemas de transmisión en alta tensión donde su implementación desempeña las siguientes funciones [1]. En primer lugar, protege las líneas de transmisión ante descargas atmosféricas al proporcionar un camino de baja impedancia, esto permite reducir el número de descargas eléctricas (Backflashover) que se producen debido al aumento de tensión de la torre de transmisión ante una descarga atmosférica directa. Además, cumple un rol fundamental en la seguridad eléctrica, protegiendo a las personas al limitar las tensiones de paso y contacto.

En este ámbito se tiene que una de las variables más importantes a considerar es la resistencia de puesta a tierra (RPT), que generalmente es medida al momento de la construcción de la torre de transmisión. En la actualidad en Chile, las exigencias mínimas para instalaciones de transmisión tal como se indican en [2], establecen que se debe llevar a cabo al menos una vez cada 3 años, una nueva medición del valor de resistencia de puesta tierra en subestaciones. Estas exigencias no se aplican a las mediciones en las torres de transmisión, lo que implica que no se exista una obligación para que se realicen verificaciones de la RPT en torres que se encuentren en operación. Además, existe una dificultad para que se realicen este tipo de mediciones, esto se debe a que las torres están conectadas mediante el cable de guarda, el cual las interconecta entre ellas. Esta condición implica problemas en la medición de RPT mediante el método convencional indicado en [3] el cual corresponde al método de caída de potencial, donde se indica que la implementación de este requiere que la torre bajo prueba se encuentre aislada del resto del sistema mediante la desconexión de los cables de guarda.

Lo anterior ha motivado a la investigación y desarrollo de métodos de medición alternativos con el fin de poder realizar mediciones sin la necesidad de desconectar el cable de guarda de la torre de transmisión bajo análisis. En consecuencia, resulta

importante identificar y analizar mediante desarrollo experimental la efectividad de los métodos actuales existentes en comparación a los tradicionales, garantizando así que los instrumentos existentes en el mercado sean efectivamente una opción viable de medición. La importancia de corroborar los métodos de medición tiene como objetivo, fomentar un monitoreo en los valores de RPT en torres de transmisión a lo largo de los años, y así verificar el estado del SPT respecto a su condición inicial.

Uno de los principales métodos recomendados para la medición de RPT en torres de transmisión corresponde al de inyección de corriente de alta frecuencia, el cual consiste en una adaptación del método de caída de potencial. Este considera un aumento en la frecuencia de la corriente inyectada a la puesta a tierra con la finalidad de aumentar la impedancia de los cables de guarda, de tal manera que esta sea mayor que la impedancia de puesta a tierra del electrodo de la torre. Esto implica que la corriente inyectada circule principalmente por el electrodo de la torre y exista un desacople de las torres vecinas conectadas mediante el cable aéreo de guarda [4]. Actualmente existe una distribución comercial de instrumentos que aplican este método, los cuales operan en un rango de frecuencias entorno a los 25-26[kHz].

Debido a la diferencia en la frecuencia de operación de los métodos de medición basados en telurómetros, es necesario verificar de manera experimental su precisión y las diferencias de medición que estos presentan. Además, se debe confirmar la exactitud de las mediciones en torres según su valor de resistencia de puesta a tierra, ya que se menciona que, para una resistencia de pie de torre superior a 20 [Ω], los telurómetros de alta frecuencia pierden precisión debido al aumento de la influencia de las impedancias paralelas de las torres adyacentes [1]. Bajo este mismo contexto surge la necesidad de explorar nuevas metodologías de mediciones alternativas, las cuales difieran de los métodos tradicionales como el de caída de potencial. Por lo que se implementará un método alternativo de medición de RPT basado en la carga neta drenada por el sistema de puesta a tierra, cuando es excitado por un generador de impulsos [5], con el objetivo de verificar su efectividad en torres de transmisión equipadas con cable de guarda.

Por último, con el fin de validar los resultados experimentales de las metodologías de medición de RPT, se utilizará un modelo computacional denominado *UN_PAT* [6], el cual se basa en el método electromagnético híbrido. Este modelo proporcionará resultados teóricos para contrastar los resultados y permitirá realizar un análisis comparativo de las distintas metodologías experimentales expuestas.

1.1. Objetivos

El presente documento tiene el objetivo general de “analizar métodos de medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda mediante pruebas experimentales y simulación computacional”.

Además, se plantearon los siguientes objetivos específicos :

- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte referente a los métodos de medición de resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión.
- Evaluar el desempeño de dos métodos alternativos de medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión, uno basado en la carga neta drenada y el otro en la medición con telurómetro de 25 [kHz].
- Implementar un modelo basado en el método electromagnético híbrido con el fin de obtener el valor de resistencia de puesta a tierra mediante simulación computacional.
- Contrastar los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante simulación, para evaluar las diferencias entre los valores de resistencia de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Puesta a tierra

La Norma IEEE-81 (“IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, 2012) [3], Define la puesta a tierra como “Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por la cual un circuito o equipo eléctrico se conecta a la tierra, o a algún cuerpo conductor de extensión relativamente grande que sirva en lugar de la tierra”.

La puesta a tierra en los sistemas eléctricos esta relacionado en primera instancia con la seguridad, esta establece uniones galvánicas entre las estructuras metálicas conductoras que estén expuestas al contacto humano, con la finalidad de obtener una conexión equipotencial para fallas de frecuencias industriales (50-60[Hz]), esto con el objetivo de evitar diferencias de potencial que pongan en riesgo la seguridad de las personas que trabajen o transiten en cercanías de una puesta a tierra [7].

Desde el punto de vista técnico una de las principales ventajas de tener un sistema eléctrico aterrizado mediante una puesta a tierra, es que esta permite proporcionarle a las fallas un camino de baja impedancia para lograr la correcta operación de los sistemas de protección como los relés o fusibles, esto se aplica tanto para sistemas de transmisión como de distribución eléctrica [8].

2.2. Resistividad del suelo

La resistividad del suelo se define como la resistencia eléctrica [Ω] entre caras opuestas de un cubo de terreno de 1 metro de lado, esta se representa en unidades de [$\Omega \cdot m$] [9].

La resistividad cambia significativamente de un lugar geográfico a otro, ya que al cambiar el tipo de suelo, implica que cambien significativamente sus propiedades. Los suelos pueden presentar estructuras homogéneas como no homogéneas y además poseer una estructura multicapas, esto se representa en la figura 1, donde se observan distintas

capas de suelo horizontales formadas ya sea por arcilla, roca u otros elementos existentes. Los modelos de suelos multicapas consideran un distinto tipo de resistividad según su estrato y una profundidad determinada para cada uno de estos. Los modelos de resistividad de suelos mas utilizados son el modelo de suelo homogéneo y los modelos de 2 capas horizontales de distinta profundidad, en mediciones reales rara vez se obtiene un modelo homogéneo, implicando que el modelo 2 capas sea uno de los mas utilizados [10].

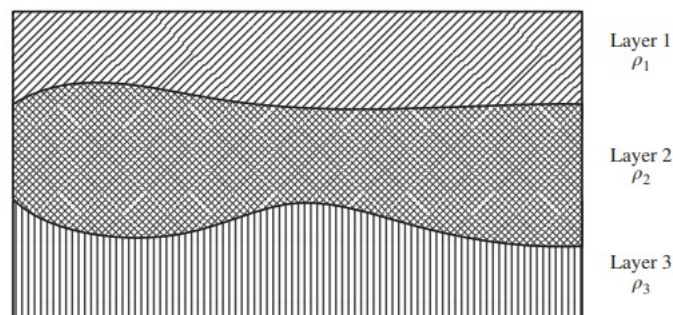


Figura 1: Estructura de multicapas horizontales para modelamiento del suelo [9].

La importancia de obtener un modelo equivalente de resistividad del terreno, tiene un factor fundamental en el desarrollo y diseño de un sistema de puesta a tierra, puesto que la resistencia de puesta a tierra depende principalmente del valor de resistividad del suelo en el cual sera implementado, por lo que las mediciones y cálculos de resistividad son un proceso previo de relevancia para diseñar adecuadamente un dispositivo de puesta a tierra.

2.2.1. Método Wenner de cuatro electrodos

Los métodos mas usados para la medición de resistividad del terreno se basan en la utilización de cuatro electrodos, donde a partir de dos electrodos de corriente y dos de tensión se obtiene la medición del perfil de potencial al hacer circular una corriente por el suelo. El método de Wenner utiliza la disposición de cuatro electrodos igualmente espaciados entre si (figura 2). La inyección de corriente se realiza mediante los electrodos C1 y C2 y la diferencia de potencial es medida mediante los electrodos P1 y P2, a partir de estas mediciones se obtiene mediante el coeficiente $\frac{V}{I}$ el valor de resistencia del suelo, la metodología aplicada consiste en obtener la medición para un espaciamiento de $a = 1[m]$, registrar la medición y aumentar el espaciamiento 1 metro para cada medición adicional.

Finalmente se calcula la resistividad aparente para cada valor de resistencia medido mediante la siguiente ecuación [11], bajo la consideración que la profundidad de enterramiento de cada electrodo es menor que el espaciamiento ‘a’ definido.

$$\rho = 2\pi Ra \quad (1)$$

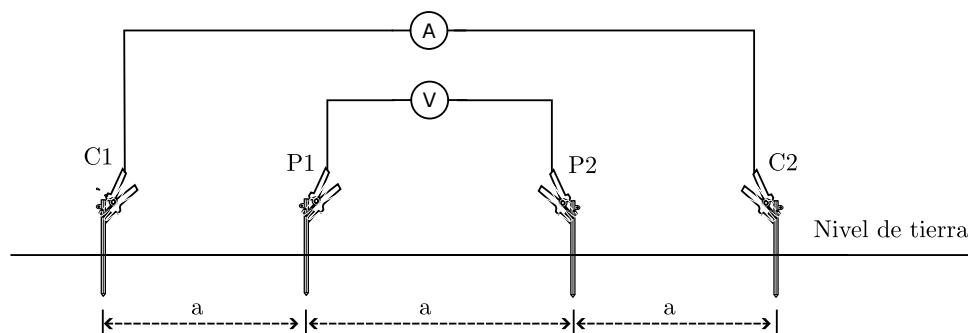


Figura 2: Disposición de cuatro electrodos mediante método de Wenner. Elaboración propia

2.3. Puesta a tierra en torres de transmisión

Los dispositivos de puesta a tierra en torres de transmisión cumplen con la función de dispersar hacia la tierra, las corrientes de rayo y las corrientes de cortocircuito de frecuencia industrial [12]. Las estructuras de los dispositivos de puesta a tierra utilizados, generalmente tienen relación con la forma de la zapata de la torre de transmisión y la estructura del suelo del emplazamiento de esta.

A continuación se definen los tipos de configuración de electrodos de puesta a tierra más utilizados en torres de transmisión

Electrodo de tierra horizontal en forma de anillo: Esta configuración consta de un anillo que forma un circuito cerrado alrededor de la estructura, ubicado en la zanja de cimentación del pie de la torre. Generalmente, se utiliza acero redondo, ya que éste posee una tasa de corrosión baja. La ventaja de esta aplicación es que, al estar añadida a la estructura de la zanja, no es necesario excavar más el suelo, lo que reduce los costos [13] [14].

Electrodo de tierra horizontal: La configuración de electrodos de puesta a tierra horizontales consta generalmente de la utilización de contrapesos. Estos consisten en conductores enterrados a una profundidad de aproximadamente 1 metro y se conectan directamente a la zapata de la torre. Se extienden de manera radial al pie de la torre con la finalidad de aumentar el área de contacto del sistema de puesta a tierra. Su longitud varía desde 5 hasta 60 metros. Esta configuración se recomienda en torres de transmisión ubicadas en suelos de alta resistividad [15].

Electrodo de tierra vertical: La aplicación de electrodos verticales consta de la implementación de varillas de cobre conectadas a la zapata de la torre. Estas son profundamente enterradas; las longitudes comúnmente utilizadas son entre 2.5 a 20 metros. Esta aplicación es bastante utilizada cuando la resistividad de las capas inferiores del terreno es inferior a la capa superficial [12].

En base a que existen diversas configuraciones de electrodos de puesta a tierra para

torres de transmisión, es importante conocer valores de referencia o normativos para el valor efectivo de resistencia de puesta a tierra del sistema implementado, por lo que a continuación se presentan en la tabla 1 los valores de referencia de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda en China, estos valores corresponden a los requerimientos exigidos en [16]

Resistividad del suelo [$\Omega \cdot m$]	Resistencia de puesta a tierra [Ω]
<100	10
100-500	15
500-1000	20
1000-2000	25
>2000	30

Tabla 1: Requisitos de valores de resistencia a tierra de una torre con cable de tierra aéreo conectado [16].

Dichos valores tienen en consideración la resistividad del suelo en el cual esta emplazada la torre de transmisión, En comparación a las exigencias en Chile indicadas en [17], donde se indica que el valor de resistencia de puesta a tierra no debe ser superior a 20 Ω independientemente de las características de resistividad del terreno donde se encuentre ubicada la torre y su respectivos electrodos de puesta a tierra.

2.4. Generación de tensión tipo impulso

Un impulso de tensión es una señal transitoria que habitualmente crece hasta alcanzar un valor máximo y después decrece más lentamente hasta cero, es por ello que la forma de onda de impulso tipo rayo consta de 3 parámetros principales que lo definen, el valor peak de la señal de impulso la cual corresponde al valor máximo que alcanza la señal, el tiempo de frente el cual representa el tiempo que tarde el impulso en alcanzar su valor peak y el tiempo de cola el cual consiste en el tiempo en el cual el impulso alcanza el 50 % de su magnitud después de haber alcanzado su valor peak [18].

La generación de una señal tipo impulso se puede realizar mediante un generador de una etapa, el cual puede ser elaborado mediante los siguientes circuitos indicados en la figura 3, estos circuitos están compuestos por una fuente de alta tensión continua la cual realiza la carga del condensador denominado C1, estos elementos forman el circuito de carga del generador de impulsos, cuando el condensador alcanza el nivel de carga deseado, se realiza la descarga mediante la utilización de espinterómetros denominados en el circuito como S1, el circuito de descarga del generador de impulsos consta de la utilización de resistencias denominadas R1 y R2 y un condensador adicional denominado C2 junto con la respectiva probeta que sera conectada a este circuito para realizar los respectivos ensayos.

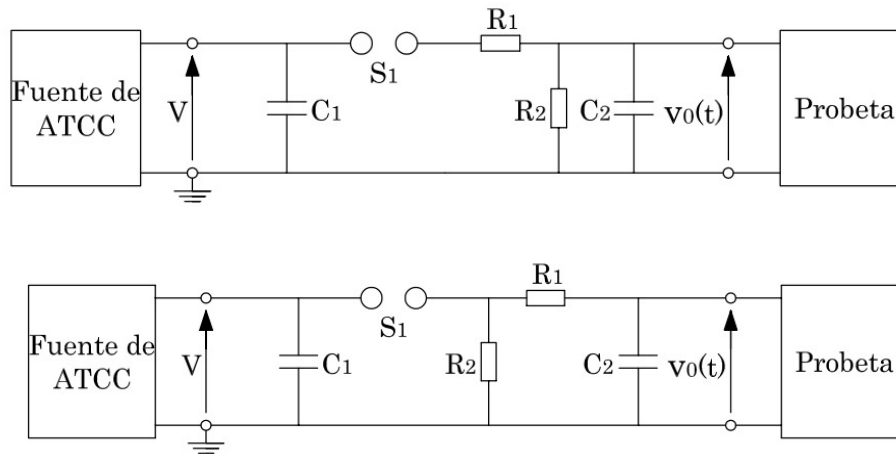


Figura 3: Esquemas básicos de generador de impulsos de una etapa [19]

Resumiendo los elementos del circuito de generación de impulsos de una etapa se tiene los siguientes elementos

- C1 capacitor de carga
- C2 capacitor de descarga
- R2 Resistencia de cola
- R1 Resistencia de frente
- S1 espinterómetro de disparo

A partir de los elementos de los circuitos presentados y del estudio realizado en [19], se obtienen las ecuaciones mostradas en la tabla 2, las cuales permiten estimar el tiempo de frente (T_f) y el tiempo de cola (T_c) de la señal tipo impulso.

Parámetro aproximado	Esquema N°1	Esquema N°2
T_f	$3 \cdot \frac{R_c \cdot R_f}{R_f + R_c} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$	$3 \cdot R_f \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$
T_c	$0,7 \cdot (R_f + R_c) \cdot (C_1 + C_2)$	$0,7 \cdot R_c \cdot (C_1 + C_2)$

Tabla 2: Parámetros aproximados para Esquemas de generación de impulso [19]

2.5. Modelamiento de sistemas de puesta a tierra mediante el Modelo electromagnético híbrido

El Modelo electromagnético híbrido se utiliza principalmente para el análisis transitorio de electrodos de puesta a tierra y problemas asociados a descargas atmosféricas [20]. Este se basa en las ecuaciones de Maxwell y las combina con la teoría de circuitos eléctricos. Una de sus principales características es que su formulación matemática se realiza en el dominio de la frecuencia, lo que permite una menor complejidad en la resolución de ecuaciones. Las principales consideraciones de este modelo son las siguientes: terreno isotrópico, lineal y homogéneo; el efecto de la frontera se representa mediante el método de las imágenes; y los conductores deben ser cilíndricos, rectilíneos y delgados. [6]

2.5.1. Calculo de resistencia de puesta a tierra mediante software UN_PAT

El software UN_PAT (Universidad Nacional - Programa de Análisis Transitorio) es una herramienta de código abierto desarrollada en C++ para analizar el comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra. Este software se basa en el Modelo Electromagnético Híbrido (MEH), una metodología que combina las ecuaciones de Maxwell y la teoría de circuitos.

El software considera lo siguiente :

- el efecto de la frontera (aire-tierra) se representa por medio del método de imágenes.
- los conductores deben ser cilíndricos, rectilíneos y delgados.
- Cada conductor es dividido en un numero finito de segmentos.
- la permitividad relativa μ es igual a uno.
- los valores de permitividad ϵ_r y conductividad σ varían según el terreno.

Además el modelo indicado en [6], asume que el efecto de las fuentes de campo (corrientes de falla o del tipo rayo) se pueda representar como dos fuentes de corriente, una longitudinal denominada I_L y una transversal I_T . Estas fuentes de corriente inducen una diferencia de potencial ΔV en los segmentos emisores “j” y un potencial V en los segmentos receptores “i”, estos potenciales son representados mediante impedancias de acoples definidas como :

$$Z_{Lij} = \frac{\Delta V_{ij}}{I_{Lj}} \quad (2)$$

$$Z_{Tij} = \frac{\Delta V_{ij}}{I_{Tj}} \quad (3)$$

donde $Z_{L_{ij}}$ corresponde a la impedancia longitudinal y $Z_{T_{ij}}$ corresponde a la impedancia transversal. La figura 4 presenta el acoplamiento entre los segmentos emisor y receptor.

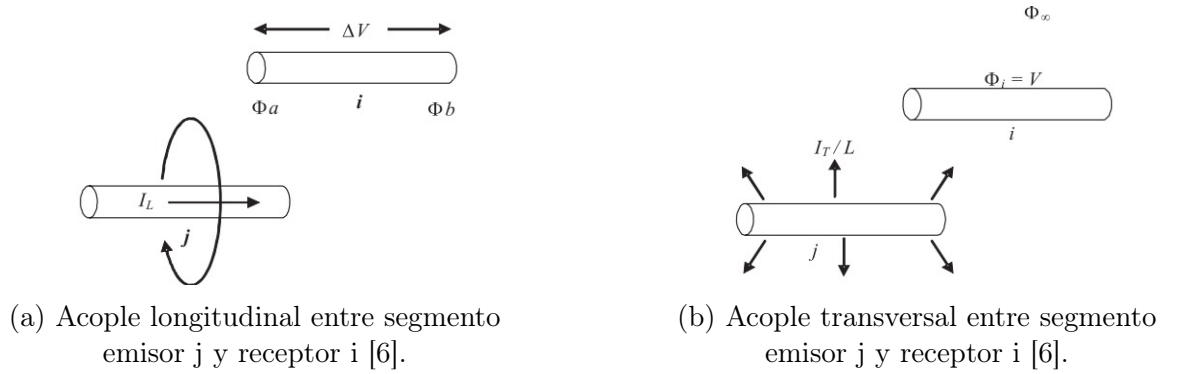


Figura 4: Acoples longitudinales y transversales entre segmento emisor j y receptor i [6].

Una vez determinados los acoplamientos entre los segmentos emisor j y receptor i , se formulan las ecuaciones que describen los efectos asociados, representados en términos de la impedancia longitudinal y la impedancia transversal [6].

$$Z_{L_{ij}} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma R}}{R} \overline{dl}_j \cdot \overline{dl}_i \quad (4)$$

$$Z_{T_{ij}} = \frac{1}{4\pi [\sigma(\omega) + j\omega\varepsilon(\omega)] L_j L_i} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma R}}{R} dl_j dl_i \quad (5)$$

donde:

- \overline{dl}_i y \overline{dl}_j son vectores diferenciales de longitud.
- dl_i y dl_j son elementos diferenciales de longitud.
- L_i y L_j son las longitudes de los segmentos.
- γ es la constante de propagación del medio:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu [\sigma(\omega) + j\omega\varepsilon(\omega)]}$$

- R es la distancia vectorial entre cada uno de los puntos diferenciales.

La eliminación de la frontera se realiza mediante el método de las imágenes. En el caso del terreno, las imágenes de las fuentes de corriente deben ser asumidas de manera que se mantenga la condición de que el campo eléctrico sea igual a cero en la frontera. Los

acoplamientos y, en consecuencia, la impedancia, se calculan para cada par de segmentos n , obteniéndose como resultado los dos siguientes sistemas de ecuaciones lineales [6]:

$$I_{T[n \times 1]} = Y_{T[n \times n]} \cdot V_{[n \times 1]} \quad (6)$$

$$I_{L[n \times 1]} = Y_{L[n \times n]} \cdot \Delta V_{[n \times 1]} \quad (7)$$

Donde Y_L y Y_T corresponden a las matrices inversas de la impedancia longitudinal Z_L y la impedancia transversal Z_T .

Para reducir el número de incógnitas y poder resolver el sistema de ecuaciones, se emplea la teoría de circuitos, lo que justifica el uso del término 'híbrido' en el modelo. El análisis realizado consiste en la aplicación de sumatorias de corriente en los nodos y la obtención de las relaciones de tensión para cada segmento a partir de las tensiones nodales.

Finalmente, con las consideraciones mencionadas y aplicando las correspondientes operaciones aritméticas y matriciales, se obtiene un único sistema de ecuaciones cuya solución proporciona las tensiones nodales a lo largo de la configuración.

$$V_{N[m \times 1]} = A_{[m \times m]} \cdot I_y[m \times 1] \quad (8)$$

Los valores de tensión obtenidos, son para una frecuencia específica por lo cual si se requiere obtener la respuesta del sistema en un rango de frecuencias se debe repetir el procedimiento para cada una de ellas.

Para mayor información del modelo electromagnético híbrido y el software UN_PAT, se puede consultar el detalle en [6].

2.6. Métodos de medición de resistencia de puesta a tierra

2.6.1. Método de caída de potencial

El método de caída de potencial se basa en la inyección de corriente, entre el electrodo de puesta a tierra a medir y una sonda auxiliar de corriente denominada CP indicada en el esquema de la figura 5 y luego realizar la medición de diferencia de potencial que se produce entre el electrodo de puesta a tierra y la sonda de tensión denominada PP, con la finalidad de disminuir el acoplamiento entre los electrodos, la sonda CP se ubica bajo una distancia mínima D de tal manera que sea 5 veces mayor que la dimensión más grande del electrodo de puesta a tierra a medir [1].

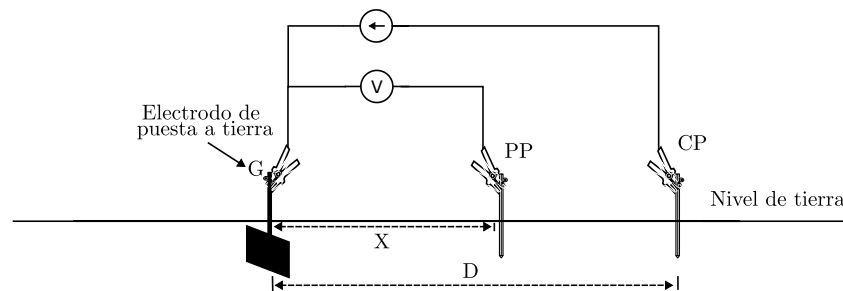


Figura 5: Esquema de medición mediante método de caída de potencial. Elaboración propia.

La ubicación de la sonda de potencial es fundamental para una medición precisa, la mejor forma práctica de realizar este procedimiento es realizar mediciones consecutivas moviendo la sonda PP hacia la sonda de corriente CP, los valores de resistencia medidos que presenten un valor de resistencia constante en función de la distancia del electrodo PP corresponde al valor de resistencia de puesta a tierra [3]. Esto se puede observar en el siguiente gráfico típico de resistencia vs distancia, donde la parte plana de la curva corresponde al valor efectivo de resistencia de puesta a tierra [21].

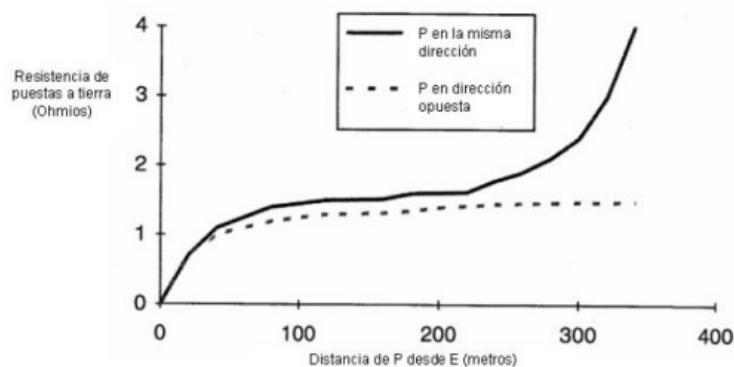


Figura 6: Resistencia de puesta a tierra versus distancia [21]

2.6.2. Método de inyección de corriente de alta frecuencia 25[kHz]

Este método de medición utiliza un esquema similar al de caída de potencial, este método presenta la variación de utilizar un dispositivo de 3 terminales que utiliza una fuente con una frecuencia de 25-26 [kHz] en comparación a los telurómetros convencionales que utilizan baja frecuencia [22].

La utilización de este método, mediante este dispositivo se desarrolló principalmente con objetivo de realizar mediciones de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión, ya que éstas al estar conectadas mediante el cable de guarda a las torres vecinas, la utilización de un telurómetro convencional está asociado a una gran fuente de error. La utilización de una frecuencia de 25[kHz] permite realizar mediciones sin desconectar los

cables de guarda que une a las torres, esto en base a que a dicha frecuencia la impedancia de los cables de guarda son lo suficientemente altas, permitiendo que la corriente inyectada circule principalmente por el electrodo de tierra de la torre de interés. Aun así un factor importante a considerar utilizando este método es el valor de resistencia del dispositivo de puesta a tierra, según lo indicado en [1] se ha confirmado la precisión de este método para electrodos de puesta a tierra inferiores a 20 $[\Omega]$.

2.6.3. Método basado en la carga neta drenada mediante excitación tipo impulso

Este método presentado en el artículo “A New Method for Grounding Resistance Measurement Based on the Drained Net Charge” [5], se diferencia principalmente de los métodos convencionales de medición de puesta a tierra, en que este método propone un calculo basado en la mediciones de corrientes inyectadas mediante una fuente tipo impulso. La teoría que sustenta este método, se basa según lo descrito en [23], donde se describe que para un circuito lineal invariante en el tiempo el cual es excitado por una fuente tipo impulso, la carga neta inyectada es igual a su equivalente calculado mediante una fuente en continua, esto implica que los inductores sean remplazados por cortocircuitos y los capacitores sean remplazados por circuitos abiertos, esto tiene un factor de gran importancia para los procedimientos de medición de puesta a tierra, puesto que bajo esta propiedad los efectos de acoplamientos electromagnéticos y efectos de reactancia en el circuito de medición puedan ser despreciados.

La aplicación básica del flujo de carga se puede explicar mediante el siguiente circuito

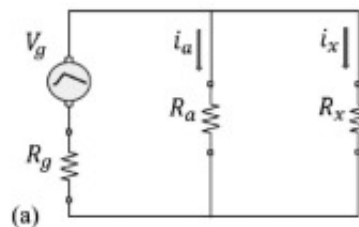


Figura 7: Circuito basico de carga neta [5]

donde se presenta como R_g la resistencia de aterrizamiento del generador de impulsos, R_a es la resistencia de puesta a tierra auxiliar y R_x es la resistencia de puesta a tierra desconocida que se busca medir, para cualquier instante de tiempo t , se cumple la siguiente relación

$$i_a \cdot R_a = i_x \cdot R_x \quad (9)$$

Dado que la carga es la integral de la corriente se puede expresar R_x de la siguiente forma

$$R_x = \frac{Q_a}{Q_x} \cdot R_a \quad (10)$$

Sin embargo esta simplificación de la aplicación de flujo de carga neta presenta el inconveniente de que se requiere conocer el valor de R_a el cual también representa una

variable desconocida, por lo cual los autores del artículo presentan el siguiente esquema mejorado el cual resuelve dicha restricción.

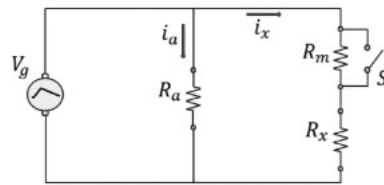


Figura 8: circuito mejorado de carga neta [5]

A diferencia del circuito básico presentado, este nuevo circuito añade la implementación de una resistencia medible R_m junto con un interruptor en paralelo a esta, con la finalidad de permitir realizar dos mediciones, una considerando R_m en el circuito y otra sin considerarla.

Finalmente se definen los siguientes factores de carga k y k' correspondientes a las mediciones con el interruptor cerrado y abierto respectivamente mediante las siguientes ecuaciones :

$$k = \frac{Q_a}{Q_x} \quad (11)$$

$$k' = \frac{Q_{a'}}{Q_{x'}} \quad (12)$$

En base a estos factores se permite calcular tanto R_x y R_a en base a las cargas netas que fluyen a través de R_x y R_a mediante las siguientes ecuaciones

$$R_x = R_m \left(\frac{k'}{k} - 1 \right)^{-1} \quad (13)$$

$$R_a = R_m (k' - k)^{-1} \quad (14)$$

Capítulo 3

Métodos seleccionados y experimentación previa

En el presente capítulo se tiene como finalidad presentar los desarrollos experimentales y computacionales previos para la implementación de dos métodos de medición de resistencia de puesta a tierra que se emplearán en este trabajo de memoria. Se detallan el desarrollo y la validación, tanto experimental como computacional, del método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada. Además, se presentan los dos telurómetros a utilizar en el desarrollo de esta memoria, junto con sus principales características y comparaciones de medición de la resistencia de puesta a tierra en electrodos simples, con el objetivo de establecer condiciones de referencia para las mediciones posteriores que se realizarán en el desarrollo de esta memoria.

3.1. Simulación y verificación del método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada

Como etapa previa a la realización de pruebas experimentales de medición de resistencia de puesta a tierra mediante la carga neta drenada, se realizó una verificación computacional de este método, implementando el circuito en el programa ATP DRAW, el cual es presentado en la figura 9.

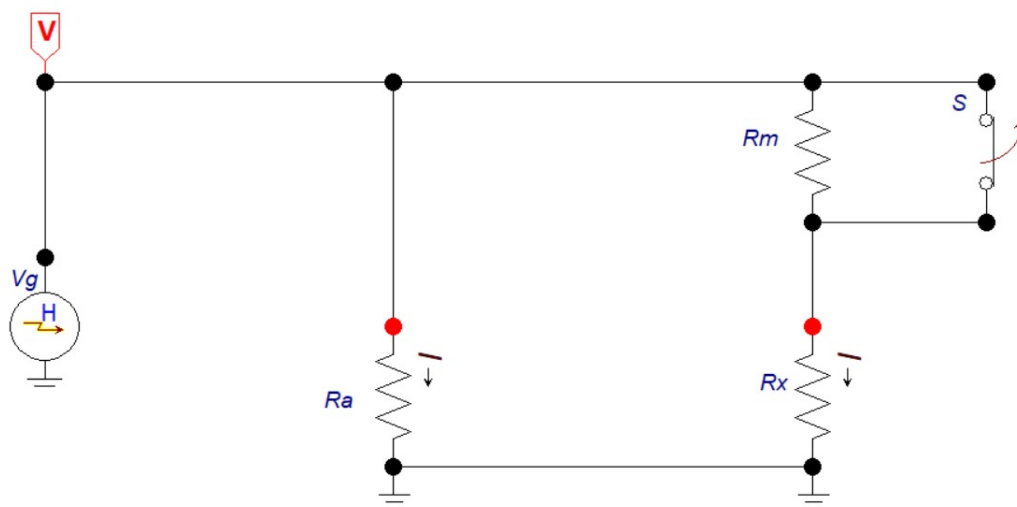


Figura 9: Circuito de medición de carga neta drenada implementado en ATP DRAW. Elaboración propia.

Los ajustes de simulación correspondientes fueron los siguientes

- **Tiempo de simulación:** $80 [\mu s]$
- **Intervalo de tiempo de paso:** $0,001 [\mu s]$

Para la representación de la fuente tipo impulso, se utilizó una fuente de tensión Heidler type 15, con una amplitud de $1500 [V]$ y una forma de onda de $2,4/13 [\mu s]$, Los valores de resistencia de R_a , R_m y R_x ajustados inicialmente, fueron 380 , 120 y $120 [\Omega]$ respectivamente, dichos ajustes fueron tomando como referencia el estudio realizado en [5].

Los resultados obtenidos a partir del circuito implementado en ATP se presentan en la fig 10, donde la fig 10a, presenta las mediciones de corriente inyectada en las resistencias Rx y Ra, tanto con el interruptor abierto como cerrado y la fig 10b presenta el gráfico de la integral acumulativa de las mediciones de corriente respectivas, este ultimo gráfico fue realizado mediante el comando `cumtrapz` en Matlab.

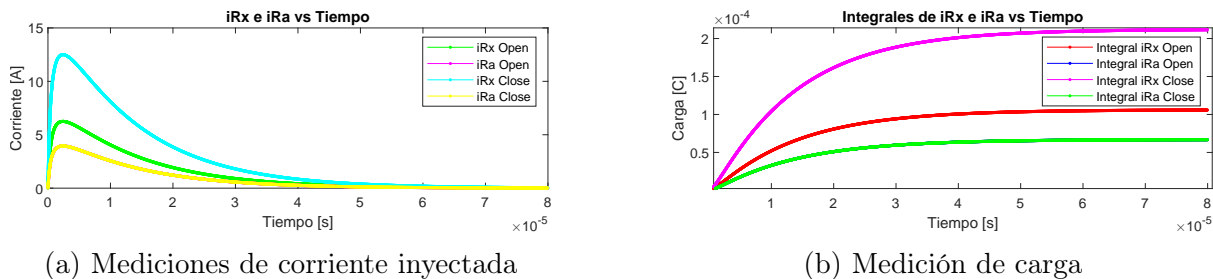


Figura 10: Mediciones del circuito implementado en ATP

Se realizó el cálculo los factores de carga k y k' según las ecuaciones presentadas en [11] y [12], para el cálculo de la integral se realizó mediante el comando `trapz` en matlab, el cual retorna el valor de la carga neta inyectada a partir de las mediciones de corriente obtenidas.

A continuación se presenta los valores de carga neta inyectada para las resistencias Ra y Rx tanto con el switch abierto como cerrado.

Variable	Resultado de la integración trapezoidal (μC)
iRx Open	105.8118
iRa Open	66.8285
iRx Close	211.6237
iRa Close	66.8285

Tabla 3: Resultados de la integración trapezoidal para diferentes variables.

Por lo que finalmente, los valores respectivos de k y k' son :

- $k=0.3158$
- $k' = 0.6316$

A partir de los factores K obtenidos, se calcula el valor de resistencia de puesta a tierra desconocido Rx, mediante la ecuación 13 obteniéndose un valor de Rx de 120 [Ω], resultado congruente con el valor de Rx ajustado. Además si bien el modelo implementado en ATP es idealizado puesto que no considera la impedancia del generador de impulsos, la tolerancia de las resistencias elegidas y tampoco considera la resistencia de aterrizamiento del generador. Aun así este desarrollo permite validar las ecuaciones y procedimientos planteados para el cálculo de resistencia de puesta a tierra mediante la carga neta drenada.

3.2. Verificación experimental del método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada

Para la implementación del método de medición basado en la carga neta drenada, tal como se indicó en las secciones anteriores, se requiere la excitación mediante una fuente de tensión tipo impulso. En el desarrollo de esta memoria y en las pruebas experimentales realizadas, se utilizó el generador de impulsos móvil, el cual se puede observar en la figura (11).



Figura 11: : Generador de impulsos móvil

El circuito asociado al generador de impulsos móvil se presenta en la figura [12]

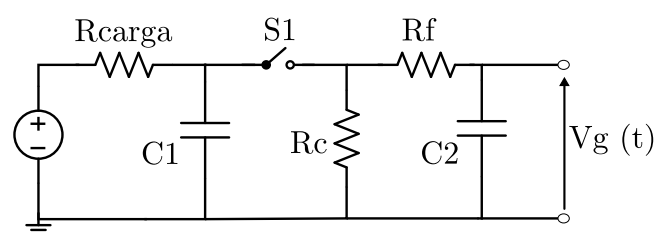


Figura 12: : Esquema del circuito del generador de impulsos. Elaboración propia.

Los elementos presentados en el circuito de generacion de impulso se definen como:

- **C1:** Capacitor de impulso.
- **C2:** Capacitor de carga.
- **Rf:** Resistencia de frente.
- **Rc:** Resistencia de cola.
- **S1:** Espinterómetro de disparo.

En la tabla [4] se presentan los valores utilizados en el generador de impulsos movil

ELEMENTO	VALOR
Rcarga	6800 [Ω]
Rf	58.11 [Ω]
Rc	15.58 [Ω]
C1	1 [μ F]
C2	0.012 [μ F]

Tabla 4: Valores utilizados en el circuito de generación de impulso

Respecto al espinterómetro de disparo, se utilizaron dos electrodos esféricos móviles de 10 [cm] de diámetro y una separación entre esferas de 0.2 [mm], con el fin de obtener los niveles de tensión adecuados para la realización de las pruebas experimentales. Como fuente de alimentación del circuito presentado se usó la fuente de tensión continua KEITHLEY 247 High Voltage Supply (figura 38).

Finalmente, se realizó la implementación experimental para evaluar la resistencia de puesta a tierra de electrodos simples, como una varilla de cobre, con el objetivo de validar los resultados teóricos obtenidos en las simulaciones computacionales y verificar el correcto funcionamiento del circuito generador de impulsos, así como de los instrumentos de medición asociados al método.

El Set-Up experimental utilizado es el presentado en la figura 13 , donde Rg representa la resistencia de aterrizamiento del generador de impulsos, Ra representa una puesta a tierra auxiliar, Rx representa la puesta a tierra desconocida a medir, Rm representa una resistencia de 120 [Ω] y finalmente para la medición de las corrientes se representan en el circuito como ia y ix las sondas de corrientes Pearson modelo 150(figura 36) en conjunto con la utilización de un osciloscopio Tektronix DPO 3014 (figura 37)

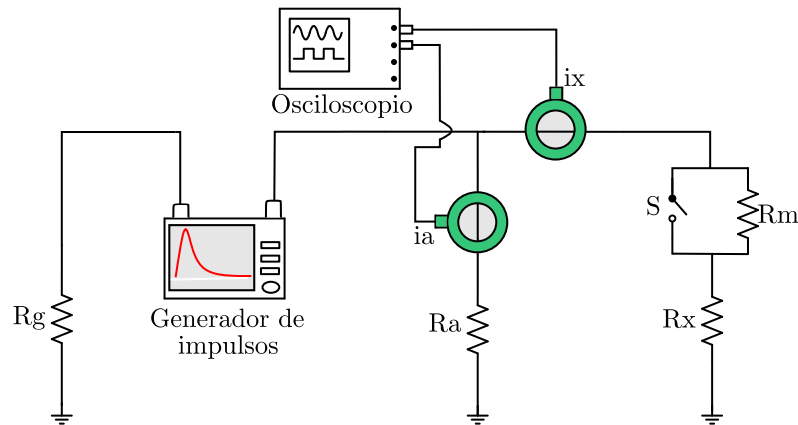


Figura 13: Diagrama circuito de medición de resistencia de puesta a tierra usando el método de carga neta drenada. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante la sondas de corrientes se resumen en la figura 14 y los valores mas significativos de dicha medición se presentan en la tabla 5

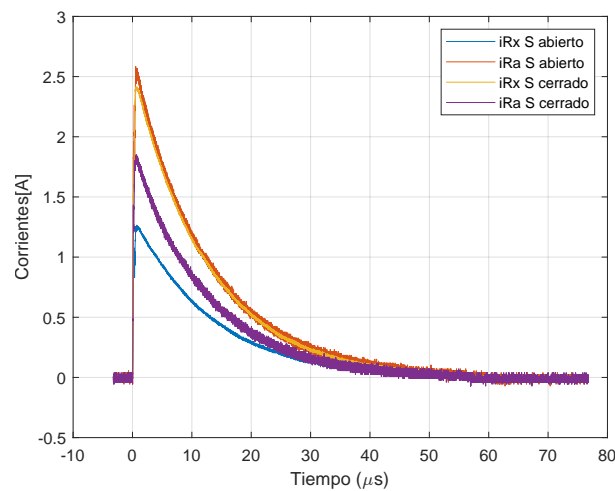


Figura 14: Mediciones de corriente para puestas a tierra simples

Componente	Peak de corriente (A)		Carga (μC)	
	S Cerrado	S abierto	S cerrado	S abierto
R_x	2.41	1.26	31.09	17.04
R_a	1.84	2.56	22.40	31.84

Tabla 5: Valores medidos para puestas a tierra simples

Utilizando las ecuaciones (11) y (12) del método, se obtiene como valores de puesta tierra para R_x y R_a los valores de $75.3[\Omega]$ y $104.5 [\Omega]$ respectivamente.

Finalmente, se realizaron las mediciones individuales de R_x y R_a mediante la utilización de un telurómetro de baja frecuencia (figura 16a), con la finalidad de comparar los resultados con los obtenidos mediante el método basado en la carga neta drenada.

A partir de los resultados de las mediciones, se graficaron las curvas de caída de potencial, las cuales se presentan en la figura 15.

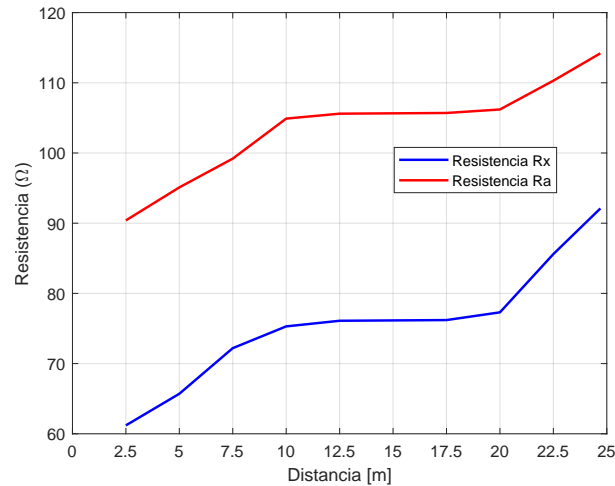


Figura 15: Mediciones de resistencia R_a y R_x

El valor de resistencia para R_a y R_x se considera como el valor medido en la zona plana de la curva, por lo que en la siguiente tabla se resume los valores medidos y el error asociado al método de la carga neta drenada respecto a la utilización de un telurómetro de baja frecuencia

Método aplicado	Valor R_a medido [Ω]	Valor R_x medido [Ω]
Telurómetro 270[Hz]	105.7	76.2
Carga neta drenada	104.5	75.3
Error [%]	1.13	1.18

Tabla 6: Resultados mediante carga neta drenada y caída de potencial para barra vertical

Los resultados obtenidos indican que, en condiciones controladas de laboratorio y utilizando un electrodo simple, como una barra vertical que fue empleado en este caso, el método basado en la carga neta drenada presenta un error del orden del 1 [%] respecto a la medición de referencia obtenida mediante un telurómetro.

3.3. Desarrollo experimental previo basado en la utilización de telurómetros

El desarrollo de esta memoria considera también la aplicación de métodos de medición de resistencia de puesta a tierra mediante la utilización de telurómetros como instrumentos de medición. Estos instrumentos se basan en el método de caída de potencial, el cual se encuentra definido en la subsección (2.6.1).

Los instrumentos a utilizar para la medición de resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda considera la utilización de dos Telurómetro del fabricante MEGABRAS, el primer instrumento utilizado consiste en el modelo EM4058 (figura 16a), este corresponde a un telurómetro de baja frecuencia, donde permite realizar mediciones en un rango de frecuencias entre los 270[Hz] a 1470[Hz] [24]. El segundo instrumento utilizado corresponde al modelo TM25R (figura 16b, este instrumento opera mediante la inyección de una corriente de 25[kHz], además a diferencia del primer instrumento a utilizar, este tiene la capacidad de detectar la componente inductiva del sistema de puesta a tierra a medir y compensarla mediante el uso de un banco de condensadores interno dentro del instrumento, debido a esta capacidad de detectar y eliminar la componente inductiva de un sistema, el instrumento entrega 2 valores de medición, R y R_c , el primero esta asociado a la impedancia equivalente que ve el instrumento, y el segundo corresponde al valor de la impedancia con la compensación inductiva lo cual es equivalente al valor efectivo de resistencia medido, en caso de que el instrumento no detecte una inductancia, este solo entrega el valor de resistencia medido y no realiza ninguna compensación [25].



(a) MEGABRAS EM4058 [24]



(b) MEGABRAS TM25R [25]

Figura 16: Telurómetros a utilizar.

Con la finalidad de obtener una referencia comparativa entre los instrumentos utilizados, como trabajo previo a la realización de mediciones en torres de transmisión, se realizó un desarrollo experimental básico, el cual consistió en la medición de resistencia de puesta a tierra de un electrodo simple. El circuito de medición implementado se presenta en la figura [17], donde E corresponde al electrodo de puesta

a tierra y junto con el electrodo auxiliar de corriente H forman el circuito de inyección de corriente, el electrodo S corresponde a la sonda de tensión.

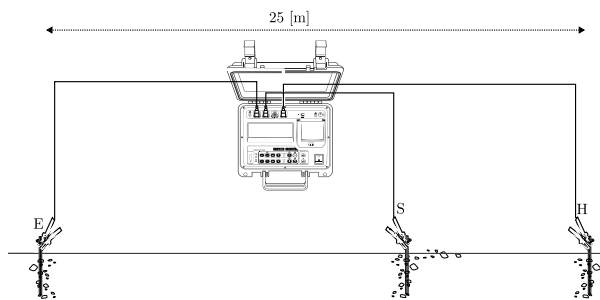


Figura 17: Esquema de medición implementado. Elaboración propia.

Como electrodo de puesta a tierra se utilizó una varilla de cobre de longitud de 1.5[m] con una profundidad de enterramiento de 0.5[m], para la utilización de electrodos de corriente y tensión se utilizaron varillas de cobre de longitud 0.5[m], la distancia de separación entre el electrodo de puesta a tierra y el electrodo de corriente fue de 25[m], esta distancia se seleccionó considerando como criterio, una distancia de separación entre el electrodo de puesta a tierra y el electrodo de corriente tal que supere como mínimo 6 veces la longitud total del electrodo de puesta a tierra a medir.

Las mediciones realizadas con los telurómetros fueron utilizando el método de caída de potencial, se inició las mediciones con el electrodo de tensión a una separación de 2.5[m] del electrodo de puesta a tierra a medir, posteriormente se prosiguió aumentando la separación del electrodo de tensión en pasos de 2.5[m], la medición más lejana fue realizada a una distancia de 24.7[m] del electrodo de puesta a tierra, esto considerando que el electrodo de corriente estaba ubicado a 25[m].

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 18.

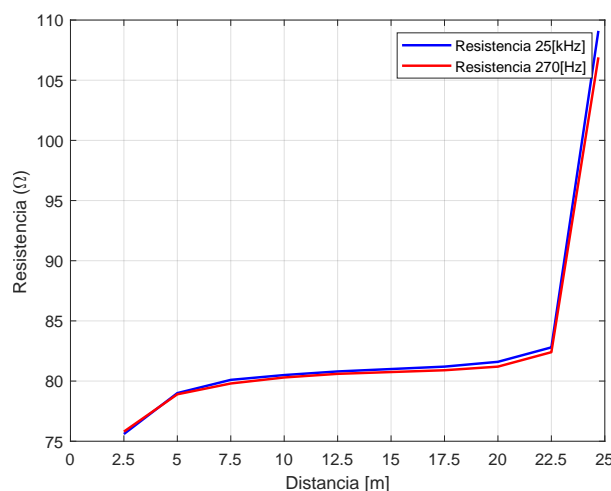


Figura 18: Gráfico de caída de potencial para telurómetros de alta y baja frecuencia

El gráfico presentado muestra que no existen diferencias significativas en las mediciones de resistencia de puesta a tierra realizadas con los telurómetros en un electrodo simple.

Además, se considera como valor efectivo de resistencia de puesta a tierra el sector plano de la curva, donde las variaciones de la resistencia medida en función de la distancia entre el electrodo de puesta a tierra y el electrodo de tensión no son significativas. Los resultados se presentan en la tabla 7

Instrumento utilizado	Resistencia [Ω]
Telurometro baja frecuencia 270[Hz]	80.7
Telurometro alta frecuencia 25[kHz]	81.0

Tabla 7: Resistencia de puesta a tierra para electrodo simple

Los resultados obtenidos permiten tener como referencia la tendencia en la medición de resistencia de puesta a tierra según el tipo de telurómetro utilizado, esto es de gran relevancia para el siguiente capítulo, donde se realizaron mediciones de resistencia de puesta a tierra en una torres de transmisión equipada con cable de guarda, donde esto implica que el sistema de puesta a tierra difiera significativamente del evaluado en esta sección.

Capítulo 4

Resultados y análisis

En el presente capítulo se presentan los resultados y análisis de los métodos de medición de puesta a tierra implementados: uno basado en la carga drenada y el otro en el uso de dos telurómetros de frecuencias de 270 [Hz] y 25.000 [Hz]. Dichas mediciones fueron realizadas en una torre de transmisión de la línea de 220 kV La Pólvara – Agua Santa, ubicada en la región de Valparaíso

4.1. Descripción de la torre de transmisión seleccionada

Los métodos de medición de resistencia de puesta a tierra, fueron implementados en la torre de transmisión PAS-27 de la línea de transmisión La Pólvora – Agua Santa 220 [kV] ubicada en la región de Valparaíso figura (19)



Figura 19: Torre de transmisión PAS-27 La Pólvora – Agua Santa 220 [kV]

Esta torre utiliza cable de guarda OPGW (Optical Ground Wire), cumpliendo con las condiciones establecidas en los objetivos de esta memoria. Es importante destacar que el circuito de transmisión aún se encuentra en construcción, por lo que la línea no está energizada. Esto implica condiciones favorables para las mediciones realizadas, ya que no se presentarán acoplamientos entre los circuitos de medición y los de la línea de transmisión

4.1.1. Mediciones de resistividad del terreno

Para el análisis y modelamiento del sistema de puesta a tierra mediante el software UN_PAT, es necesario como dato de entrada el valor de resistividad del terreno, por lo que una de las mediciones realizadas fue la de resistividad del terreno, Esta fuera realizada siguiendo la metodología de medición de resistividad mediante el método de Wenner indicado en 2.2.1. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla :

a [m]	resistividad [$\Omega \cdot m$]
1	109.1
2	99.2
3	105.1
4	114.6
5	120.7
6	137.3
7	135.0
8	144.8

Tabla 8: Mediciones resistividad de terreno mediante método de Wenner

a partir de las mediciones obtenidas, se realizó el calculo del modelo de resistividad de 2 capas horizontales mediante la herramienta computacional MATLAB, los resultados del modelo se presentan a continuación

- Resistividad capa superior 99.2 [$\Omega \cdot m$]
- Profundidad capa superior 2.18[m]
- Resistividad capa inferior 144.8[$\Omega \cdot m$]
- Profundidad capa inferior ∞
- Error del modelo 6.1 %

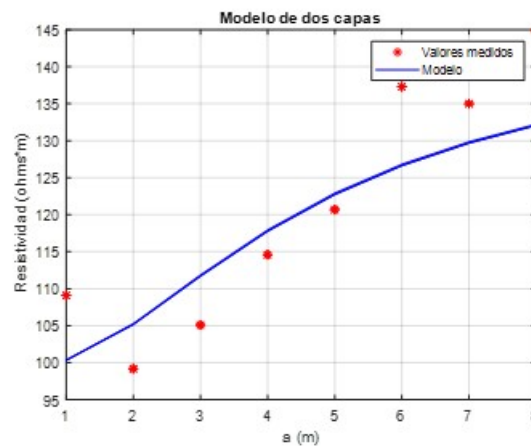


Figura 20: Curva de resistividad obtenida

4.1.2. Dispositivo de puesta a tierra de la torre

Otra característica importante para la realización de esta memoria, es conocer el tipo de dispositivo de puesta a tierra con el cual cuenta la torre de transmisión, el tipo de puesta a tierra consta de la utilización de 2 cables de contrapesos, conectados a los pies de la torre según lo indicado en la figura 21, este dispositivo consta de un cable de diámetro 0.00952[m], una longitud de 9.5 [m] y se encuentra enterrado con una profundidad de 0.5[m].

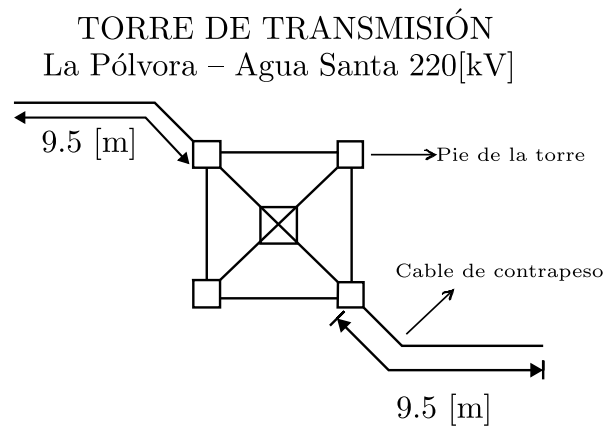


Figura 21: Disposición del dispositivo de puesta a tierra. Elaboración propia

4.2. Resultados y análisis mediante la utilización de telurómetros basados en el método de caída de potencial

4.2.1. Procedimientos de medición

El procedimiento de medición de resistencia de puesta a tierra mediante el método de caída de potencial se realizó mediante la utilización de dos telurómetros, estos se encuentran presentados en la sección (3.3).

La frecuencia de medición utilizada en el telurómetro de baja frecuencia se seleccionó en un valor de 270[Hz] con la finalidad de tener un mayor margen de diferencia de frecuencias respecto al telurómetro de alta frecuencia que opera a 25[kHz]. El diagrama de medición mediante el método de caída de potencial se presenta en la figura 22, donde el circuito de inyección de corriente se representa mediante los terminales E y H, la medición de tensión del instrumento se realiza entre la conexión E y la jabalina de tensión S representada en el circuito.

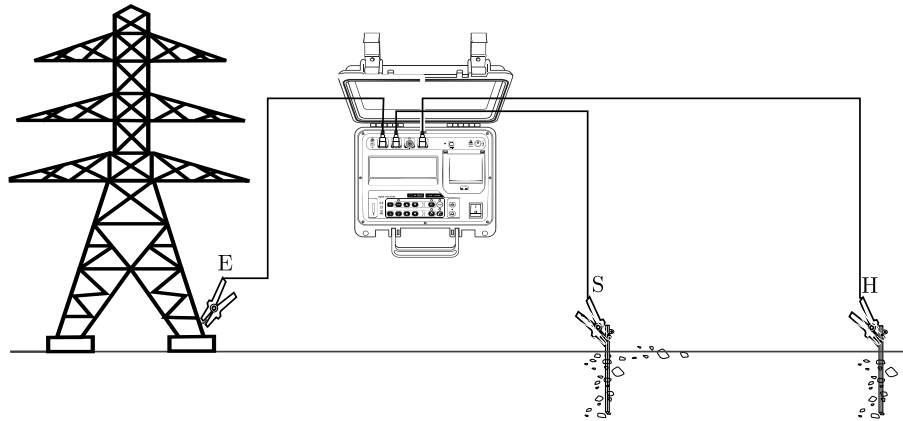


Figura 22: Diagrama de medición de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión mediante la utilización de telurómetros. Elaboración propia.

La jabalina de corriente H se ubicó a una distancia de separación respecto al punto de medición del pie de la torre de 110[m] con tal de minimizar los acoplamientos entre el electrodo de corriente H y el electrodo de puesta a tierra de la torre de transmisión. Se realizaron 8 mediciones mediante el movimiento de la jabalina de tensión S, cubriendo un aproximado del 40 al 90 % de la distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra de la torre.

La figura 23 presenta la vista aérea de la dirección en la cual se realizaron las mediciones



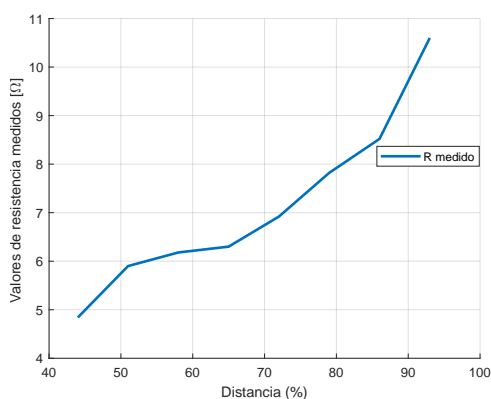
Figura 23: Vista aérea del eje de medición realizado

Tal como se observa en la vista aérea del eje de medición, se identificaron limitaciones

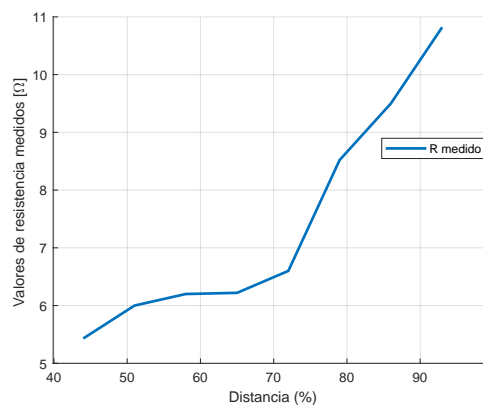
de espacio debido a la topografía del terreno en el emplazamiento de la torre. Estas restricciones limitaron las posibles direcciones para aplicar el método de caída de potencial, por lo que solo fue posible realizar las mediciones en una única dirección, orientada hacia la subestación.

4.2.2. Resultados de mediciones de resistencia de puesta a tierra mediante telurómetros en torre de transmisión

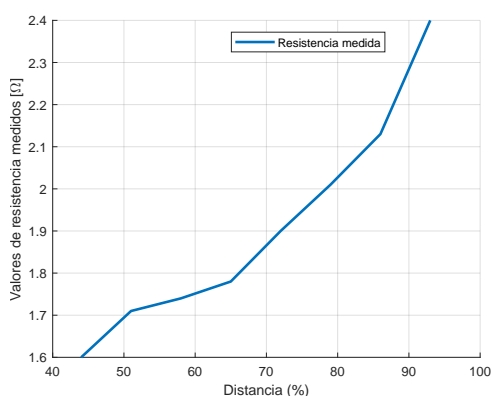
Los resultados obtenidos a través de los procedimientos descritos en la sección anterior se presentan en la figura 24. En esta figura se muestran las curvas de medición registradas con los dos telurómetros mencionados, tanto para la condición de la torre de transmisión conectada al cable de guarda como para la condición desconectada.



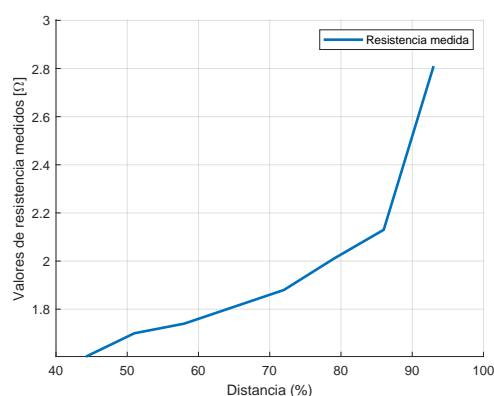
(a) Mediciones de resistencia con cable de guarda conectado a la torre mediante telurómetro de 25[kHz]



(b) Mediciones de resistencia con cable de guarda desconectado de la torre mediante telurómetro de 25[kHz]



(c) Mediciones de resistencia con cable de guarda conectado a la torre mediante telurómetro de 270[Hz]



(d) Mediciones de resistencia con cable de guarda desconectado de la torre mediante telurómetro de 270[Hz]

Figura 24: Mediciones de resistencia de puesta a tierra en torres con y sin cable de guarda conectado para diferentes frecuencias.

4.2.3. Análisis de resultados

Considerando los resultados presentados en las curvas de caída de potencial indicados en la figura 24, donde se observa que no existe una diferencia significativa entre las mediciones con el cable de guarda conectado y desconectado para ambos telurómetros, se destacan principalmente los resultados obtenidos mediante el telurómetro de 270 Hz. En este caso, los resultados esperados indicaban que debía existir una diferencia en la medición, ya que el caso de la torre conectada mediante el cable de guarda debería implicar una reducción en el valor medido. Debido a que las mediciones se encuentran en un rango acotado, se considerará que el cable de guarda de la torre de transmisión no fue desconectado correctamente, por lo que dichas mediciones no se consideran válidas.

Teniendo en consideración lo anteriormente mencionado y basándose en las mediciones en condición de cable de guarda conectado se observa que no se presenta una zona plana de la curva de caída de potencial, esto se debe principalmente a las limitaciones de distancia de ubicación del electrodo de corriente, donde este fue ubicado en dirección hacia la subestación eléctrica a una distancia aproximada de 110[m] de la torre de transmisión medida, por lo que los resultados indican que el electrodo no fue ubicado en una distancia considerable para evitar los acoplamientos. En base a esto es que no es posible dar un valor único de resistencia de puesta a tierra según el telurómetro utilizado, por lo cual en la siguiente tabla se presenta un rango posible de valores en los cuales se encuentra el valor efectivo de resistencia de puesta a tierra de la torre de transmisión, teniendo como criterio, la selección del rango de valores en función de los puntos medidos que menor diferencia de resistencia tenían entre si.

Resultados RPT con cable de guarda conectado	
Metodo aplicado	Resultado experimental
Telurómetro 270[Hz]	[1.67;1.82] [Ω]
Telurómetro 25000[Hz]	[5.9;6.92] [Ω]

Tabla 9: Rango de valores de resistencia de puesta a tierra mediante la utilización de telurómetros

4.3. Resultados mediante método de medición de resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada

4.3.1. Procedimiento experimental

La aplicación del método de carga neta en la torre de transmisión, se realizó en dos condiciones: con y sin el cable de guarda conectado. El procedimiento experimental consistió en implementar el diagrama indicado en la figura 25. El generador de impulsos utilizado, como se muestra en el diagrama, fue el mismo equipo utilizado en la sección 3.2 para la validación experimental previa realizada. La resistencia desconocida a medir,

definida como R_x , se representa directamente como el pie de la torre de transmisión, la resistencia de valor conocido, se representa directamente como una resistencia de $120\ [\Omega]$. Finalmente tanto para la resistencia auxiliar R_a como para el aterrizamiento del generador de impulsos R_g , se utilizó una barra de cobre de longitud 1.5[m] enterrada a una profundidad de 1[m] .

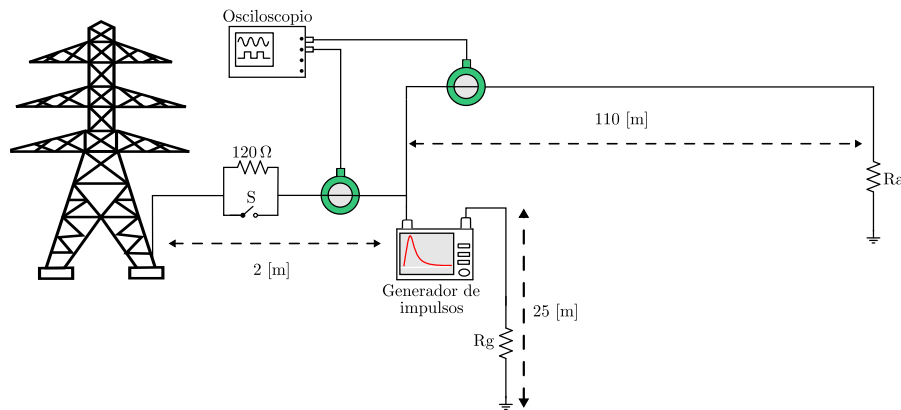


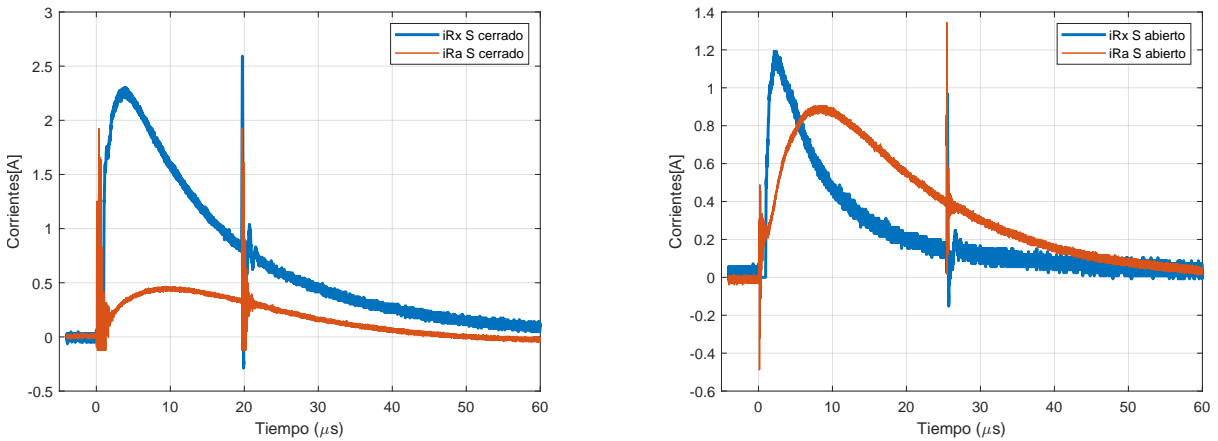
Figura 25: Diagrama de medición de resistencia de puesta a tierra en torre de transmisión mediante método basado en la carga neta drenada. Elaboración propia.

El procedimiento consistió en realizar inyecciones de impulsos de tensión del orden de los $1000[V_{peak}]$ en el pie de la torre de transmisión, tanto con el interruptor S en posición abierta como cerrada. Las corrientes fueron medidas utilizando las sondas de corriente Pearson 150 (figura 36), las cuales poseen un ancho de banda desde los 40[Hz] hasta 20[MHz] , las sondas de corrientes se conectaron al osciloscopio Tektronix DPO 3014 (figura 37). Las señales obtenidas fueron guardadas en un dispositivo USB para su posterior análisis y procesamiento mediante la herramienta computacional MATLAB.

4.3.2. Resultados de mediciones en torre de transmisión con cable de guarda conectado.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en una torre de transmisión con la condición de cable de guarda conectado. Las mediciones realizadas fueron siguiendo los procedimientos indicados anteriormente en la sección 4.3.1. Los resultados obtenidos mediante las sondas de corriente se presentan en las siguientes figuras, donde la figura 26a representa las corrientes que circulan por R_x y R_a en la condición del interruptor S cerrado, además destacar que la corriente iRa se representa multiplicada por un factor de 5, con la finalidad de permitir observar de mejor manera las corrientes. Respecto a las mediciones en condiciones del interruptor abierto se representan en la figura 26b.

Los valores más significativos de las mediciones realizadas se presentan en la tabla 10. Donde para el cálculo de la carga neta de las corrientes medidas se realizó utilizando el comando `trapz` en MATLAB.



(a) Mediciones de corrientes con interruptor cerrado

(b) Mediciones de corrientes con interruptor abierto

Figura 26: Mediciones de corriente para torre con cable de guarda conectado

Componente	Peak de corriente (A)		Carga (μC)	
	S Cerrado	S abierto	S cerrado	S abierto
R_x	2.3	1.19	37.8	14.4
R_a	0.07	0.90	0.65	22.10

Tabla 10: Valores medidos para torre conectada con cable de guarda

A partir de los valores de carga obtenidos para las condiciones de S abierto y cerrado, se obtiene mediante la ecuación (11) los factores de carga k y k' .

$$k = \frac{Q_a}{Q_x} = \frac{0.65}{37.8} = 0.017$$

$$k' = \frac{Q_{a'}}{Q_{x'}} = \frac{22.1}{14.4} = 1.53$$

Finalmente a partir de los factores de carga obtenidos, se procedió a calcular el valor de resistencia de puesta a tierra desconocido R_x mediante la ecuación 13 obteniéndose :

$$R_x = R_M \left(\frac{k'}{k} - 1 \right)^{-1} = 120 \left(\frac{1,53}{0,017} - 1 \right)^{-1} = 1,34[\Omega]$$

4.3.3. Resultados de mediciones en torre de transmisión con cable de guarda desconectado

Los resultados obtenidos mediante las sondas de corriente se presentan en las siguientes figuras, donde la figura 27a representa las corrientes que circulan por Rx y Ra en condiciones de switch cerrado, además destacar que la corriente iRa se representa multiplicada por un factor de 5, con la finalidad de permitir observar de mejor manera las corrientes. Respecto a las mediciones en condiciones del interruptor abierto se representan en la figura 27b.

Los valores más significativos de las mediciones realizadas se presentan en la tabla 11.

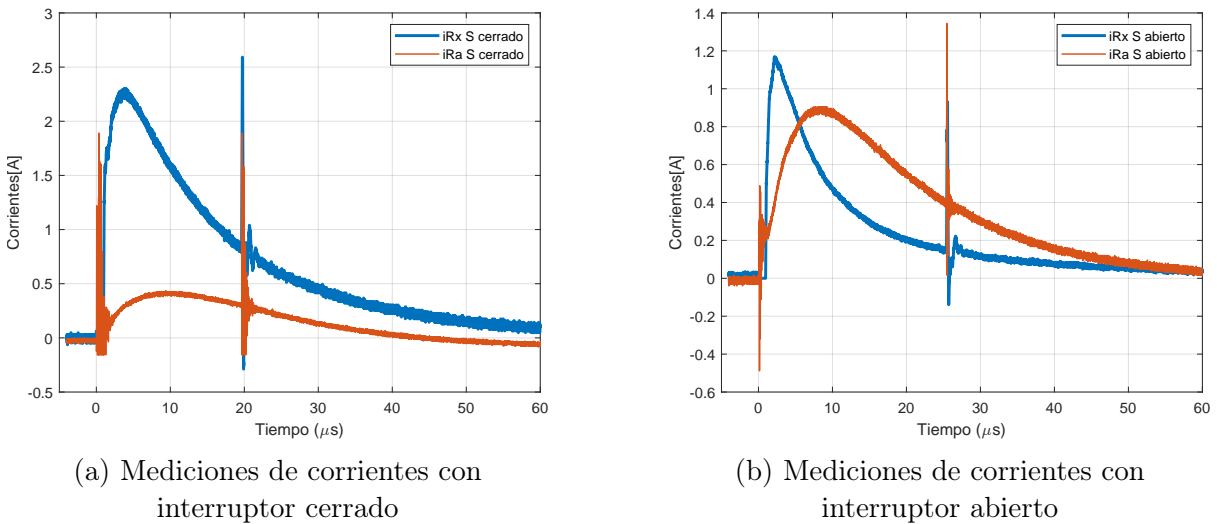


Figura 27: Mediciones de corriente para torre sin cable de guarda conectado.

Componente	Peak de corriente (A)		Carga (μC)	
	S Cerrado	S abierto	S cerrado	S abierto
R_x	2.3	1.13	42.5	11.04
R_a	0.07	0.85	0.6	20.2

Tabla 11: Valores medidos para torre sin cable de guarda

Realizando el mismo procedimiento para el calculo de los factores de carga k y k' indicado en la sección anterior se obtiene :

$$k = \frac{Q_a}{Q_x} = \frac{0.6}{42.5} = 0.016$$

$$k' = \frac{Q_{a'}}{Q_{x'}} = \frac{20.2}{11.04} = 1.83$$

Finalmente a partir de los factores de carga obtenidos, se procedió a calcular el valor de resistencia de puesta a tierra desconocido R_x mediante la ecuación 13 obteniéndose

$$R_x = R_M \left(\frac{k'}{k} - 1 \right)^{-1} = 120 \left(\frac{1.83}{0.016} - 1 \right)^{-1} = 1.05 [\Omega]$$

4.3.4. Análisis de resultados

Es importante considerar el análisis de las formas de ondas obtenidas en la aplicación del método, donde en la figura 28 se presenta uno de los resultados obtenidos para la aplicación de este método en la torre de transmisión con cable de guarda conectado.

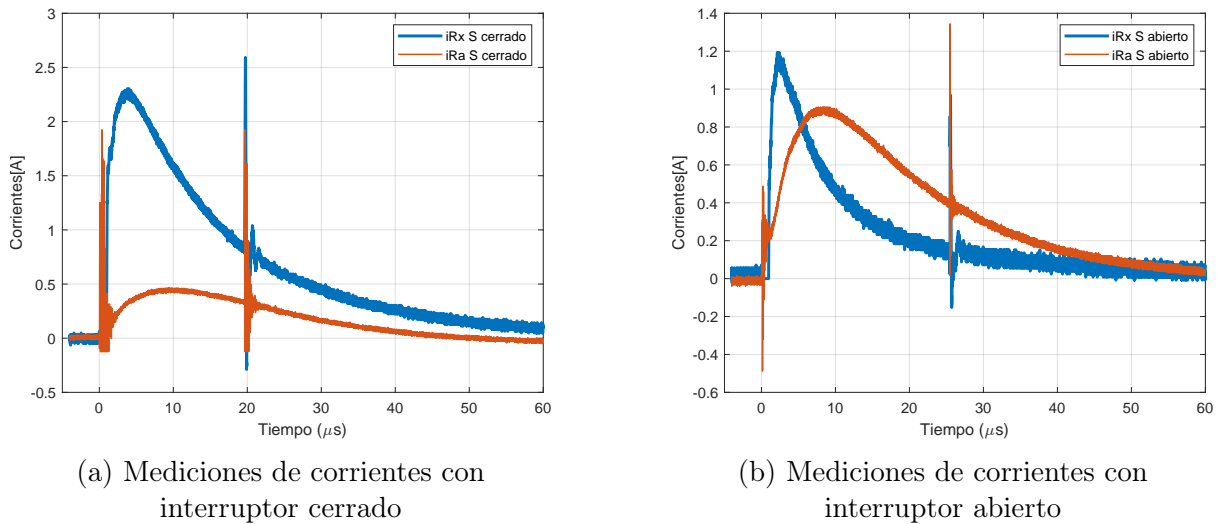


Figura 28: Mediciones de corriente para torre con cable de guarda conectado.

Se puede observar de las señales de corriente medidas, que estas presentan oscilaciones significativas en el tiempo de frente de la señal de impulso y tiempos en una ventana de 20 a 30[μs], estas oscilaciones representan una fuente de error asociada y no es propia de los resultados esperados, esto tomando como referencia los resultados obtenidos en la sección 3.2, donde las formas de onda no presentaban este tipo oscilaciones. La razón principal se debe a los efectos inductivos de la torre de transmisión como a las de los cables utilizados, dicho efecto fue comprobado experimentalmente en el laboratorio en condiciones controladas, donde el generador de impulsos presenta una sensibilidad ante las oscilaciones debido a las conexiones y conductores utilizados.

Además, a partir de los resultados se observa la misma tendencia de los valores a los obtenidos mediante el telurómetro de baja frecuencia. Donde los valores medidos en las condiciones de cable de guarda conectado y desconectado (1.3 y 1.05 [Ω], respectivamente) no muestran una diferencia significativa. Esto valida la consideración de que las mediciones sin el cable de guarda conectado sean consideradas como no válidas, debido a una desconexión incorrecta del cable de guarda de la torre.

Capítulo 5

Desarrollo computacional para el modelado de torre de transmisión y calculo de resistencia de puesta a tierra

En este capítulo se presentan los resultados computacionales para el sistema de puesta a tierra de la torre de transmisión mediante el método computacional UN_PAT.

Ademas se detalla la elaboración de un modelo de la torre de transmisión y sus respectivos electrodos de puesta a tierra mediante el software ATP.

5.1. Resultado computacional mediante software UN_PAT

El procedimiento de cálculo del valor de resistencia del sistema de puesta a tierra de la torre de transmisión, fue realizado mediante la simulación en el software UN_PAT [6], donde a partir de la geometría de los electrodos se calcula el valor de resistencia teórica del sistema de puesta a tierra, para la condición de la torre de transmisión desconectada del cable de guarda.

Los parámetros de simulación se resumen a continuación :

- El modelado de los dos contrapesos de la torre se realizó considerando una geometría compuesta por una varilla vertical de 3 [m] que simula el pie de la torre, junto con un electrodo horizontal de 9,5 [m], que representa el electrodo de contrapeso.
- Para el modelado de los pies de la torre sin contrapeso, se consideró una varilla vertical de 3 [m], que representa el pie de la torre existente en el terreno.
- Se usó una resistividad aparente uniforme de $110[\Omega \cdot m]$
- Se usó una permitividad relativa de 36
- Se consideró una profundidad de enterramiento de 0.5[m]

La geometría del sistema de puesta a tierra implementada en el software se presenta en la figura 29.

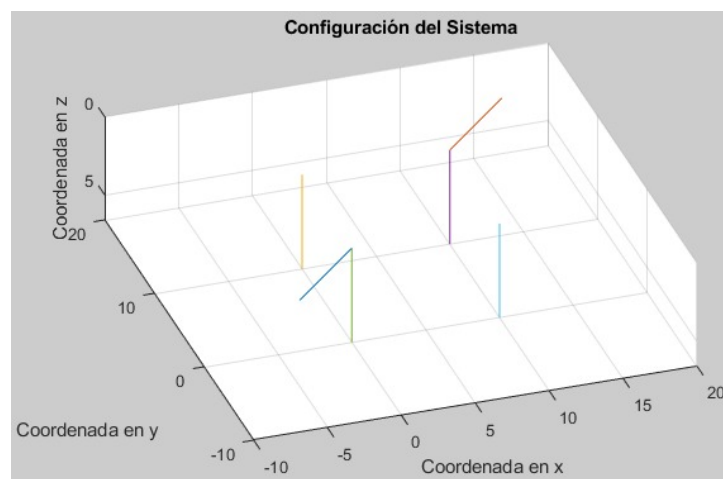


Figura 29: Configuración del sistema de puesta a tierra en UN_PAT

A partir del modelo del sistema, se obtiene un valor de resistencia de puesta a tierra de 6.6 [Ω]

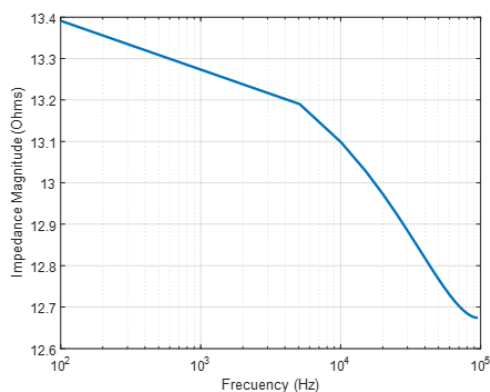
5.2. Modelo del circuito equivalente de una torre de transmisión

Con el fin de permitir realizar un análisis de los resultados obtenidos mediante las metodologías experimentales aplicadas, así como el análisis de las condiciones de la torre de transmisión con el cable de guarda conectado, se desarrolló un modelo que permite representar tanto el tipo de electrodo presente en la torre de transmisión como la estructura de la propia torre.

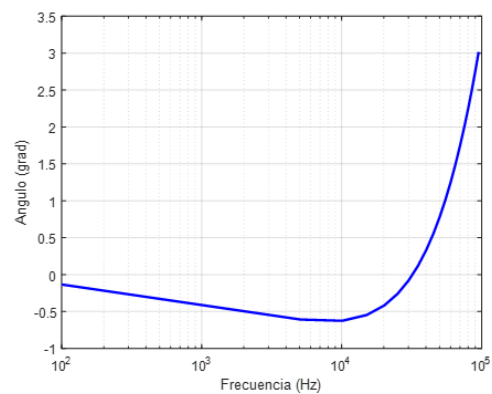
5.2.1. Modelado de los electrodos de la torre de transmisión

Para la obtención de los parámetros para el modelamiento de los electrodos de la torre de transmisión fueron obtenidos mediante la simulación computacional mediante el software UN_PAT [6].

Los dos pies que cuentan con contrapesos fueron simulados considerando una barra vertical de 3 [m] junto con un electrodo horizontal de 9.5 [m], los pies que no cuentan con contrapeso fueron simulados como una barra vertical de longitud 3[m], los resultados de la simulación se presentan en las figuras 30 y 31

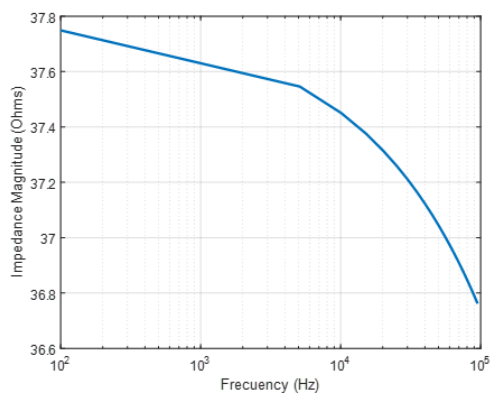


(a) Magnitud de impedancia para contrapeso 9.5 [m]

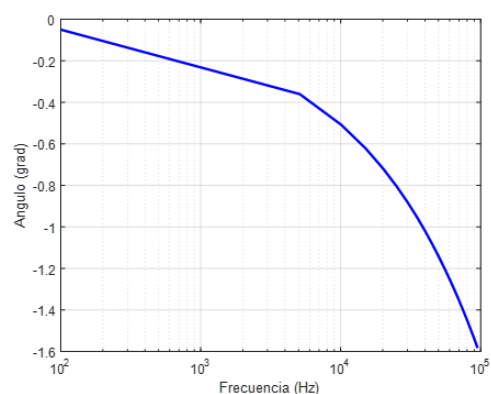


(b) Angulo para contrapeso 9.5 [m]

Figura 30: Resultado computacional obtenido para simulación de contrapeso de 9.5[m] y barra vertical de 3 [m].



(a) Magnitud de impedancia para barra vertical 3 [m]



(b) Angulo para barra vertical 3 [m]

Figura 31: Resultado computacional obtenido para simulación de barra vertical de 3 [m].

A partir de los resultados obtenidos, se observa que para ambas configuraciones se tiene un comportamiento capacitivo, por lo que se elaboró un modelo R-C PARALELO, para una frecuencia de 25[kHz] que represente individualmente cada estructura de electrodo de los pies de la torre de transmisión.

En la siguiente tabla se resumen los valores correspondientes al modelo R-C PARALELO :

Tipo de electrodo	R [Ω]	C [μF]
Contrapeso y barra vertical	12.95	0.0021
Barra vertical	37.29	0.0022

Tabla 12: Valores R-C paralelo para modelos de electrodos

Consideraciones del modelo de los electrodos:

La obtención del modelo R-C de los electrodos se llevó a cabo de forma individual. Esto significa que las configuraciones de electrodo de barra vertical y de barra vertical con contrapeso se simularon de manera independiente, considerando únicamente un electrodo para cada una de las geometrías descritas previamente.

Este procedimiento se realizó bajo la suposición de que no existe efecto de acoplamiento entre los electrodos de cada pie de la torre simulada, esto basado en la consideración de que el modelo fue diseñado para bajas frecuencias y los electrodos no posean longitudes significativas.

5.2.2. Modelo de la estructura de la torre de transmisión

Para el modelado de la estructura de la torre de transmisión, se tomó como referencia los modelos transitorios presentados en [26] [27] [28], donde estos consideran un modelo R-L PARALELO para representar la torre de transmisión dividido en 4 secciones de la torre. Los

componentes R-L fueron calculados mediante las ecuaciones presentadas en [15]

$$R_i = \frac{-2 \cdot Z_{T1} \cdot \ln \sqrt{\gamma} h_i}{h_1 + h_2 + h_3} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (15)$$

$$R_4 = -2 \cdot Z_{T2} \cdot \ln \sqrt{\gamma} \quad (16)$$

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2h}{c} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (17)$$

Los parámetros principales se resumen en la tabla, donde estos fueron obtenidos de [15] y [29]

ZT1	220[Ω]
ZT2	150[Ω]
γ	0.8
c	300[$\frac{m}{\mu s}$]
α	1

Tabla 13: Resumen de parámetros

Los parámetros definidos como L_4 y R_4 representan las componentes que modelan la sección de la torre que conecta entre si cada pie de la torre hasta el centro de la estructura principal, la figura 32 representa el esquema asociado y adicionalmente añade el modelo R-C asociado a los electrodos de la torre, donde las componentes R_{x1}, C_{x1}, R_{x3} y C_{x3} , representan el modelo R-C de los contrapesos de 9.5[m] y las componentes R_{x2}, C_{x2}, R_{x4} y C_{x4} el modelo R-C modelado como una barra vertical de 3[m] para los pies de la torre sin contrapeso.

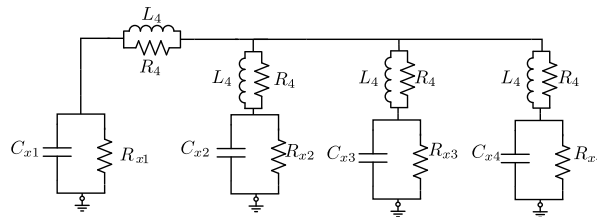


Figura 32: Modelo pies de la torre y estructura. Elaboración propia

Ademas para representar las secciones superiores de la torre de transmisión, se obtiene un equivalente R-L paralelo denominados R_{teq} y L_{teq} , para el modelado del cable de guarda se consideró un modelo R-L serie denominados R_{gw} y L_{gw} . Finalmente se añade una componente Z denominada Z_{eq} que representa la impedancia equivalente del modelo de la torre de transmisión elaborado desde el punto superior, la figura 33 representa el modelo final elaborado.

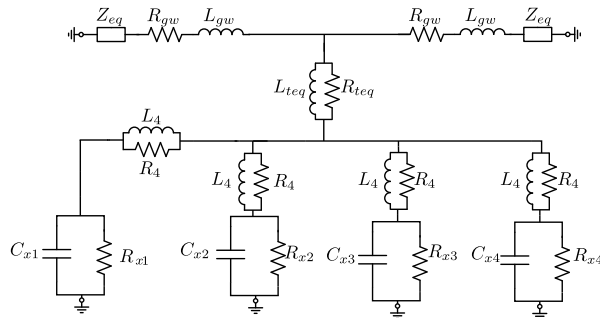


Figura 33: Modelo final torre de transmisión. Elaboración propia

La inductancia y resistencias denominadas L_{gw} y R_{gw} , presentada en el modelo, fueron estimadas considerando las referencias [1] [25]. El resumen de los valores de cada componente se presenta en la siguiente tabla :

Componente	Valor
R_{x1}	12.79 [Ω]
R_{x2}	37.29 [Ω]
R_{x3}	12.79 [Ω]
R_{x4}	37.29 [Ω]
R_4	33.47 [Ω]
R_{teq}	49.01 [Ω]
R_{gw}	2 [Ω]
C_{x1}	2.1 [nF]
C_{x2}	2.2 [nF]
C_{x3}	2.1 [nF]
C_{x4}	2.2 [nF]
L_4	0.042 [mH]
L_{teq}	0.019 [mH]
L_{gw}	0.036 [mH]

Tabla 14: Resumen de valores del modelo de la torre de transmisión equipada con cable de guarda

Capítulo 6

Comparación teórico-experimental

El presente capítulo presenta la comparación de los resultados experimentales obtenidos respecto al valor teórico calculado mediante el modelo computacional UN_PAT. Además se implementa el modelo de la torre de transmisión con cable de guarda en el software ATP con el fin de validar el modelo realizado y analizar el efecto del cable de guarda en las mediciones según su respectiva metodología aplicada.

6.1. Implementación modelo de la torre en ATP

Con el fin de evaluar el modelo de la torre de transmisión elaborado y contrastarlo con los valores experimentales obtenidos, se realizó la implementación del modelo de la torre en el software ATP, donde en la figura 34, se resume el circuito implementado donde se añade una fuente de corriente que simula la inyección de corriente que aplican los métodos implementados experimentalmente, la ubicación de esta fuente representa la conexión física realizada en terreno, donde se realizó la inyección de corriente en uno de los pies de la torre.

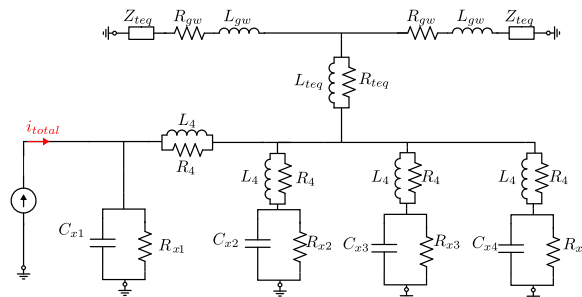


Figura 34: Modelo de la torre implementado en ATP. Elaboración propia

6.2. Comparación teórico experimental de los métodos aplicados

Con el fin de evaluar el modelo de la torre de transmisión elaborado y contrastarlo con los valores experimentales obtenidos, se realizaron las simulaciones correspondientes, evaluando el valor de resistencia calculado tanto para el método mediante la utilización de telurómetros como del método basado en la carga neta drenada, para la condición de la torre de transmisión con cable de guarda conectado. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Resultados RPT Experimental V/S Simulación ATP		
Método aplicado	Resultado experimental	Resultado Computacional ATP
Telurómetro 270[Hz]	[1.67;1.82] [Ω]	1.97 [Ω]
Telurómetro 25000[Hz]	[5.90;6.92] [Ω]	6.43 [Ω]
Carga neta drenada	1.34[Ω]	2.00 [Ω]

Tabla 15: Resultados de resistencia de puesta a tierra para torre de transmisión con cable de guarda conectado

Se puede observar de los resultados obtenidos, que el modelo representa una buena aproximación de la torre de transmisión y el efecto del cable de guarda en los métodos de medición aplicados experimentalmente. Además el modelo elaborado permite corroborar de manera teórica el porcentaje de la corriente que se distribuye por la estructura hacia las torres vecinas mediante el cable de guarda según el tipo de método de medición aplicado, los resultados se resumen en la siguiente tabla :

Método aplicado	Corriente distribuida por las torres vecinas
Telurómetro 270[Hz]	58.1[%]
Telurómetro 25000[Hz]	12.3[%]
Carga neta drenada	32.69[%]

Tabla 16: Porcentaje de la corriente total inyectada que se distribuye por las torres vecinas.

A partir de los resultados presentados en la tabla 15 y corroborándose con los porcentajes de corriente que se distribuye por las torres vecinas, se puede concluir que el método que mejor logra desacoplar las torres corresponde al telurómetro de 25[kHz]. Además se observa que el método de la carga neta drenada también posee un error asociado al cálculo, puesto que la medición de corriente medida experimentalmente se realizó considerando el total de la corriente inyectada, por lo que el porcentaje que no se inyecta al SPT en la torre introduce un error en la medición.

Adicionalmente, el modelo elaborado permite analizar la condición de la torre desconectada del cable de guarda, en la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos y la comparación con los resultados experimentales.

Resultados RPT Experimental V/S Simulación ATP		
Método aplicado	Resultado experimental	Resultado Computacional ATP
Telurómetro 270[Hz]	[1.75;1.88] [Ω]	4.76 [Ω]
Telurómetro 25000[Hz]	[5.98;7.01] [Ω]	6.47 [Ω]
Carga neta drenada	1,05[Ω]	4.8 [Ω]

Tabla 17: Resultados de resistencia de puesta a tierra para torre de transmisión sin cable de guarda conectado

Los resultados presentados indican una diferencia significativa entre los valores obtenidos experimentalmente y los valores teóricos. Estos resultados permiten concluir que las mediciones experimentales de resistencia de puesta a tierra en la torre de transmisión, en la condición de cable de guarda desconectado, no son válidas debido a una incorrecta desconexión del cable de guarda.

Adicionalmente, se presenta con la finalidad de tener un valor de referencia para las mediciones mediante telurómetros, el resultado de la medición de resistencia de puesta a tierra obtenido por los especialistas de la empresa CELEO. El método utilizado fue el de caída de potencial, destacándose el instrumento de medición empleado, que corresponde al telurómetro del fabricante AEMC MODEL 6472, en conjunto con el adaptador GROUND FLEX MODEL 6474.



Figura 35: Telurómetro AEMC y adaptador GroundFlex [30] .

La principal característica de este equipo de medición es que, gracias al adaptador GroundFlex, permite medir la corriente total inyectada a través de sensores flexibles

conectados en cada pie de la torre. Esto implica que el cálculo de la resistencia realizado por el instrumento no considera el error asociado a la corriente distribuida por el cable de guarda hacia las torres vecinas [30], además, el instrumento junto con su accesorio, permite la inyección de corrientes en un rango de frecuencias que va desde 16 hasta 400 [Hz]

El valor medido de la resistencia de puesta a tierra fue de 6.41 [Ω] para la condición de la torre de transmisión con el cable de guarda conectado.

Finalmente, considerando el resultado obtenido mediante el modelo computacional UN_PAT presentado en la sección 5.1, y dado que esta simulación no tiene en cuenta el efecto del guarda, por lo tanto, no se considera el error asociado a este, se realizó la estimación de los errores para las mediciones experimentales en relación con el valor de referencia obtenido.

Método aplicado	Valor de resistencia medido [Ω]	Valor de resistencia calculado [Ω]	Error Max [%]
Telurómetro 270[Hz]	[1.67;1.82]	6.6	74.7
Telurómetro 25000[Hz]	[5.90;6.92]	6.6	10.61
Telurómetro AEMC	6.41	6.6	2.88
Carga neta drenada	1.34	6.6	79.7

Tabla 18: Error porcentual de las mediciones experimentales

Considerando los errores porcentuales obtenidos y los análisis realizados en la presente sección, se concluye que el método experimental aplicado con mayor exactitud corresponde al del telurómetro de 25[kHz], además se observa una tendencia similar en los valores de medición entre el telurómetro de 25 [kHz] y el telurómetro AEMC, destacándose la diferencia en la frecuencia de inyección de corriente, que es de 25 [kHz] en el telurómetro Megabras frente a los 41 [Hz] empleados por el equipo del fabricante AEMC. Además se verificó tanto de manera experimental como teórica, que el método mediante telurómetros de baja frecuencia en este caso 270[Hz] no es válido para mediciones en torres de transmisión equipadas con cable de guarda. Finalmente y como objetivos de esta memoria, el cual consistía en implementar y verificar el desempeño del método basado en la carga neta drenada en torres de transmisión, se concluye que este método no es aplicable para la condición de torre de transmisión con cable de guarda conectado.

Capítulo 7

Conclusiones

- La verificación experimental y teórica demostró que el uso de telurómetros de baja frecuencia para medir la resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda introduce un error significativo, del orden de 74.7 [%], lo cual invalida este método para su aplicación en estas condiciones.
- Se verificó, de manera experimental y teórica, la precisión en la medición de la resistencia de puesta a tierra utilizando un telurómetro de 25 kHz, obteniéndose un error aproximado del 10.61 [%]. Este error puede reducirse mediante mejoras en la implementación experimental. A pesar de ello, los resultados validan el uso de la alta frecuencia como método de medición para la resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda.
- El modelo elaborado para la representación de una torre de transmisión fue validado mediante los resultados experimentales, obteniéndose errores del orden del 8.2[%] respecto a las mediciones basadas en telurómetros. Este modelo permite realizar un análisis de los métodos de medición aplicados a la torre de transmisión y verificar el efecto que el cable de guarda tiene sobre estos.
- Se realizó la verificación y validación del método de medición de la resistencia de puesta a tierra basado en la carga neta drenada, tanto para electrodos simples como para torres de transmisión equipadas con cable de guarda. Los resultados experimentales obtenidos para electrodos simples, como una barra vertical, mostraron un error del orden de 1.18 % respecto a la medición con un telurómetro. La implementación de este método, tanto teórica como experimental, en una torre de transmisión equipada con cable de guarda arrojó un error del 79.7 %. Este error está asociado tanto a los errores experimentales derivados de la implementación como al efecto del cable de guarda y las torres vecinas conectadas a esta. Por lo tanto, se concluye que este método no es aplicable para la medición de la resistencia de puesta a tierra en torres de transmisión equipadas con cable de guarda.

- El programa computacional UN_PAT demostró ser una herramienta confiable para la estimación de la resistencia de puesta a tierra, ya que sus resultados fueron consistentes con las mediciones experimentales. Este programa permitió, además, estimar de manera individual la impedancia en el dominio de la frecuencia, facilitando la elaboración de un modelo equivalente de la torre de transmisión junto con sus respectivos electrodos. El valor proporcionado por el modelo fue utilizado como referencia para contrastar los resultados experimentales, ya que calcula la resistencia de puesta a tierra de la torre sin considerar el error de medición asociado al cable de guarda.

Desafíos futuros

Para futuras investigaciones, se propone realizar la aplicación de los métodos de medición en una torre de transmisión que cuente con un espacio que permita realizar mediciones de resistencia de puesta a tierra mediante el método de caída de potencial, utilizando distintas direcciones para los electrodos de tensión y corriente, con la finalidad de corroborar el efecto de acoplamiento entre los electrodos de tensión y corriente. También se propone implementar el método de carga neta drenada en electrodos de distintas geometrías para verificar su precisión.

Referencias

- [1] EPRI, *Guide for Transmission Line Grounding: A Roadmap for Design, Testing, and Remediation: Part I—Theory Book*, 2007.
- [2] CNE, “Anexo técnico exigencias mínimas de diseño de instalaciones de transmisión.”
- [3] IEEE, “Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system,” *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, pp. 1–86, 2012.
- [4] H. L. L. Salamanca, P. A. B. Block, F. Retorta, D. B. Dahlke, L. R. A. Gamboa, R. T. Bee, and T. F. Aquino, “Residual current method of grounding resistance measurement in transmissions towers with earth wire - part 1: Study of residual current in transmission towers,” in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD)*, 2016, pp. 1–6.
- [5] C. E. F. Caetano, J. O. S. Paulino, C. F. Barbosa, J. C. de Oliveira e Silva, and A. R. Panicali, “A new method for grounding resistance measurement based on the drained net charge,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 3, pp. 1011–1018, 2019.
- [6] J. H. Montaña, O. Duarte, Á. M. Sarmiento, M. A. Marín, and H. Torres, “Un_pat: Programa para el cálculo de potenciales transitorios en puestas a tierra,” *Revista Ingenieria E Investigacion*, vol. 26, pp. 143–148, 2006. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109356149>
- [7] Procobre, *Sistemas de Puesta a Tierra*. Santiago, Chile: Procobre, 2013.
- [8] P. Ortuondo, “Manual para el proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra,” *Imprenta América*, 1997.
- [9] E. B. Joffe and K.-S. Lock, *The Grounds for Grounding*, 2023, pp. 137–170.
- [10] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Measurement and Modeling of Soil Resistivity*, 2012, pp. 81–129.
- [11] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” *IEEE Std 80-2013 (Revision*

- of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015*), pp. 1–226, 2015.
- [12] J. He, R. Zeng, and Zhang, *Grounding of Transmission and Distribution Lines*, 2012, pp. 275–302.
- [13] OBO Betterman, *Earthing systems guide: Planning, execution and practical implementation*, OBO Betterman.
- [14] Deutsches Institut für Normung (DIN), “Foundation earth electrode – planning, execution and documentation,” DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlín, Tech. Rep. DIN 18014:2014-03, 2014.
- [15] J. Martinez-Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, 1st ed., J. Martinez-Velasco, Ed. CRC Press, 2010, <https://doi.org/10.1201/9781420065305>.
- [16] C. P. Industry, *Grounding of AC Electrical Devices*. Beijing: Hydraulic and Electrical Engineering Press, 1998, no. Standard DL/T621-1997.
- [17] SEC, *Pliego Técnico Normativo RPTD N° 06*, 2021.
- [18] International Electrotechnical Commission, *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, Std., 2010. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/300>
- [19] J. L. Dinamarca, *Apuntes Técnicas de Alta Tensión*. Chile: UTFSM, 2007.
- [20] S. Visacro and F. Silveira, “Evaluation of current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model,” *Journal of Electrostatics*, vol. 60, no. 2, pp. 111–120, 2004, selected Papers from the 26th International Conference on Lightning Protection. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388604000324>
- [21] *Pliego Técnico Normativo: RIC N°06 Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial*, dictado por: Resolución Exenta N° 33.877, de fecha 30/12/2020, de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
- [22] A. G. Leal, A. E. Lazzaretti, and H. L. López-Salamanca, “A systematic review on grounding impedance measurement in electrical installations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 214, p. 108953, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622010021>
- [23] J. C. d. O. e Silva, A. R. Panicali, C. F. Barbosa, C. E. F. Caetano, and J. O. S. Paulino, “Electric charge flow in linear circuits,” *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 57–63, 2019.
- [24] MEGABRAS, *EM-4058 Digital Earth Tester User Guide*, MEGABRAS, 2016, gF-

2029RB.

- [25] *TM-25R High-Frequency Earth Tester User Guide*, MEGABRAS, 2013, gF-2050.
- [26] T. V. Gomes, M. A. O. Schroeder, R. Alipio, A. C. S. de Lima, and A. Piantini, "Investigation of overvoltages in hv underground sections caused by direct strokes considering the frequency-dependent characteristics of grounding," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 2002–2010, 2018.
- [27] M. Puka and N. Hobdari, "The lightning study of overhead transmission lines."
- [28] J. A. Martinez-Velasco and F. Castro-Aranda, "Modeling of overhead transmission lines for lightning studies," *IPST 2005*, pp. 19–23, 2005.
- [29] M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani, and T. Higuchi, "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1327–1335, 1991.
- [30] AEMC Instruments, *GroundFlex Adapter Model 6474: User Manual*, USA.

Anexos

Instrumentación utilizada



Figura 36: Sonda de corriente Pearson 150



Figura 37: Osciloscopio Tektronix 3014



Figura 38: KEITHLEY 247 High Voltage Supply



Figura 39: MEGABRAS EM4058



Figura 40: MEGABRAS TM25R

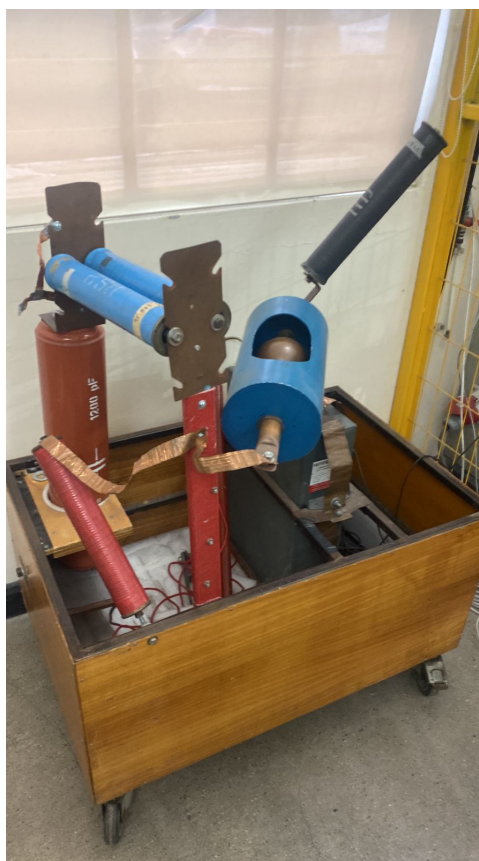


Figura 41: Generador de impulsos móvil