

Estudio de las corrientes espurias y procedimiento para la medición de las tensiones de paso y contacto en los sistemas de puesta a tierra de líneas de transmisión eléctrica.

Juan Sebastián Estupiñán Arenas y Miguel Ángel Gómez Morales

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Eléctricista

Director

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en ciencias con énfasis en Ingeniería Eléctrica

Codirector

José David Esparza Gómez

Magister en Sistemas Energéticos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A mis queridos padres, quienes con su paciencia y amor incondicional me han brindado una gran fortaleza. Agradezco profundamente su sacrificio, su fe inquebrantable en mí, y las valiosas lecciones sobre esfuerzo y perseverancia que me han impartido.

A la Universidad Industrial de Santander, mi alma mater, por ofrecerme las herramientas necesarias y ser el escenario de mi desarrollo tanto académico como personal. A todos mis profesores y compañeros, gracias por cada enseñanza y por acompañarme en esta etapa crucial de mi vida.

A mi pareja, Dayanna Quintero, mi refugio y constante fuente de motivación. Gracias por ser ese apoyo incondicional y por permanecer a mi lado en cada paso de este camino

**Sebastián Estupiñan Arenas**

A mis padres Liliana Morales y Miguel Gómez, cuyo amor y sacrificio han sido la base de mis logros, a mi compañera, Natalia Ordoñez por estar a mi lado en cada momento de la vida, y a mi familia, que fueron un apoyo fundamental en cada momento. La confianza continua que me han brindado ha sido el motor que me impulsó a alcanzar esta meta.

Que este trabajo de grado sea un modesto reflejo de mi agradecimiento y amor hacia ustedes.

**Miguel Gómez Morales**

### **Agradecimientos**

Queremos extender nuestros agradecimientos a Dios y a todas las personas e instituciones cuya valiosa contribución ha sido fundamental para la culminación de este proyecto. Sus aportes, consejos y respaldo fueron de suma importancia para alcanzar nuestros objetivos con éxito.

Nos gustaría reconocer especialmente a nuestro director, Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, y a nuestro codirector, José David Esparza Gómez, por su guía, paciencia y dedicación a lo largo de todo este proceso. Sus orientaciones y sugerencias fueron invaluablemente constructivas.

Asimismo, deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestras familias por su constante apoyo y aliento. Su amor y respaldo incondicional nos han servido de inspiración y motivación durante nuestra vida académica.

Por último, pero no menos importante, reconocemos a la Universidad Industrial de Santander por proporcionar los recursos esenciales tanto para la realización de este trabajo como para nuestra formación profesional. Sin su respaldo y colaboración, este proyecto no habría sido posible. Además, extendemos nuestro agradecimiento a Copower Ltda, ESSA, ODIR, Evalcón y al profesor Néstor por suministrarnos datos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

A todos ustedes, nuestro más sincero agradecimiento.

**Tabla de Contenido**

|                                                                                                             | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Introducción .....                                                                                          | 9           |
| 1. Caracterización de corrientes espurias en líneas de transmisión eléctrica.....                           | 11          |
| 1.1 Mediciones de corrientes espurias .....                                                                 | 13          |
| 2. Guía metodológica para mediciones de tensión de paso y contacto con énfasis en corrientes espurias ..... | 15          |
| 2.2 Con medidor de tensión de paso y contacto de alta frecuencia .....                                      | 20          |
| 2.3 Con medidor de tierra convencional.....                                                                 | 21          |
| 3. Mediciones experimentales.....                                                                           | 22          |
| 3.1 Medición de corrientes espurias.....                                                                    | 23          |
| 3.2. Medición de resistencia de puesta a tierra. ....                                                       | 24          |
| 3.2.1. Método de caída de potencial. ....                                                                   | 24          |
| 3.2.2. Método de la pendiente.....                                                                          | 25          |
| 3.2.3 Medición con equipo de alta frecuencia. ....                                                          | 27          |
| 3.3. Mediciones de tensión de paso y contacto.....                                                          | 27          |
| 3.3.1. Medición de tensión de paso.....                                                                     | 28          |
| 3.3.2. Medición de tensión de contacto.....                                                                 | 29          |
| 3.4. Análisis de resultados .....                                                                           | 30          |
| 4. Conclusiones.....                                                                                        | 33          |
| Referencias Bibliográficas.....                                                                             | 36          |

**Lista de Tablas**

|                                                                                                                                         | <b>Pág.</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1 <i>Mediciones de Corrientes Espurias en Líneas de Transmisión</i> .....                                                         | 14          |
| Tabla 2 <i>Resumen medición de resistencia en Minas.</i> .....                                                                          | 30          |
| Tabla 3 <i>Resumen medición de resistencia en La Cira.</i> .....                                                                        | 30          |
| Tabla 4 <i>Resumen de mediciones con medidor de tensión de paso y contacto minas.</i> .....                                             | 31          |
| Tabla 5 <i>Resumen de mediciones con medidor de tensión de paso y contacto La Cira con frecuencia diferente a la fundamental.</i> ..... | 31          |
| Tabla 6 <i>Resumen de mediciones con medidor de tensión de paso y contacto La Cira en frecuencia fundamental</i> .....                  | 31          |
| Tabla 7 <i>Resumen de mediciones de corrientes espurias.</i> .....                                                                      | 32          |
| Tabla 8 <i>Recomendación de equipos</i> .....                                                                                           | 32          |

**Lista de Figuras**

|                                                                                       | <b>Pág.</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1 <i>Distribución geográfica de las mediciones.</i> .....                      | 13          |
| Figura 2 <i>Histograma de Corrientes Espurias en mA.</i> .....                        | 14          |
| Figura 3 <i>Esquema de proceso para medición de tensión de paso y contacto.</i> ..... | 16          |
| Figura 4 <i>Esquema de normas referenciales.</i> .....                                | 17          |
| Figura 5 <i>Esquema de medición de tensión de contacto.</i> .....                     | 19          |
| Figura 6 <i>Esquema de medición de tensión de paso.</i> .....                         | 20          |
| Figura 7 <i>Esquema de procedimiento de mediciones experimentales en campo.</i> ..... | 23          |
| Figura 8 <i>Medición de corriente espuria con pinza amperimétrica.</i> .....          | 24          |
| Figura 9 <i>Resultado medición con medidor de tierra convencional.</i> .....          | 25          |
| Figura 10 <i>Resultados de medición para método de la pendiente.</i> .....            | 26          |
| Figura 11 <i>Resultado final de medición de resistencia.</i> .....                    | 26          |
| Figura 12 <i>Varillas interconectadas.</i> .....                                      | 28          |
| Figura 13 <i>Mediciones de tensión de paso y contacto.</i> .....                      | 29          |

## Resumen

**Título:** Estudio de las corrientes espurias y procedimiento para la medición de las tensiones de paso y contacto en los sistemas de puesta a tierra de líneas de transmisión eléctrica.\*

**Autor:** Juan Sebastián Estupiñán Arenas y Miguel Ángel Gómez Morales\*\*

**Palabras Clave:** Corrientes espurias, Tensión de paso y contacto, Sistemas de puesta a tierra, Líneas de transmisión

**Descripción:** Las tensiones de paso y contacto pueden suponer un riesgo significativo para las personas en las proximidades de las estructuras de transmisión. Un problema importante que afecta a estas mediciones es la presencia de corrientes espurias, las cuales son corrientes no deseadas que circulan en el sistema debido a diversos factores, como armónicos o interferencias electromagnéticas. Estas corrientes pueden alterar las mediciones, generando resultados imprecisos y comprometiendo la fiabilidad de las evaluaciones de seguridad, lo que resalta la necesidad de implementar métodos que mitiguen su influencia.

En este trabajo de grado, se ha desarrollado un procedimiento para realizar mediciones de tensiones de paso y contacto en presencia de corrientes espurias. A través de una guía metodológica basada en normas técnicas internacionales como la IEEE Std. 81, se propone un enfoque que permite obtener mediciones seguras y precisas, utilizando técnicas de inyección de corriente de prueba y métodos de compensación para corregir los efectos de las corrientes espurias. Esta metodología es implementada en estudios de campo, con resultados que permiten validar la importancia de estas prácticas para mantener la seguridad en los sistemas de transmisión eléctrica.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga  
Doctor en ciencias con énfasis en Ingeniería Eléctrica. Codirector: José David Esparza Gómez.  
Magister en Sistemas Energéticos

### Abstract

**Title:** Study of Spurious Currents and Procedure for Measuring Step and Touch Voltages in Grounding Systems of Electric Transmission Lines\*

**Author(s):** Juan Sebastián Estupiñán Arenas and Miguel Ángel Gómez Morales \*\*

**Key Words:** Spurious currents, Step and touch voltage, Grounding systems, Transmission lines.

**Description:** Step and touch voltages can pose a significant risk to people near transmission structures. An important issue affecting these measurements is the presence of spurious currents, which are unwanted currents circulating in the system due to various factors such as harmonics or electromagnetic interference. These currents can distort the measurements, leading to inaccurate results and compromising the reliability of safety assessments, highlighting the need for methods that mitigate their influence.

In this thesis, a procedure has been developed to measure step and touch voltages in the presence of spurious currents. Through a methodological guide based on international technical standards such as IEEE Std. 81, an approach is proposed that enables safe and accurate measurements using test current injection techniques and compensation methods to correct the effects of spurious currents. This methodology is implemented in field studies, with results validating the importance of these practices in maintaining the safety of electrical transmission systems.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electric engineering. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Doctor of science with emphasis in Electrical Engineering. Codirector: José David Esparza Gómez. Master in energy systems

## Introducción

Este trabajo de grado tiene como objetivo principal entender el impacto de las corrientes espurias en las mediciones de tensiones de paso y contacto en los sistemas de puesta a tierra de líneas de transmisión eléctrica. La presencia de estas corrientes puede afectar significativamente la precisión de las mediciones, ya que comprometen la fiabilidad de los resultados.<sup>1</sup>

En este contexto, se ha llevado a cabo una caracterización de las corrientes espurias en los sistemas de puesta a tierra de líneas de transmisión eléctrica, identificando aspectos clave como su magnitud. A partir de esta caracterización, se ha desarrollado un procedimiento de medición que permite determinar las tensiones de paso y contacto en los alrededores de las torres de transmisión, independientemente de la magnitud de las corrientes espurias.

Las mediciones experimentales realizadas durante este proyecto en los sistemas de puesta a tierra de líneas de transmisión eléctrica han seguido estrictamente un protocolo de seguridad, conforme a las directrices emitidas por un organismo de inspección eléctrica. Todas las mediciones se realizaron con equipos de medición certificados y calibrados por el Organismo Nacional de Acreditación (ONAC).

Este trabajo de grado de igual forma menciona el impacto de las tensiones de paso y contacto mal medidas, las cuales representan un peligro para cualquier persona cercana a la torre de soporte de la línea de transmisión.

Este documento se organiza en varios capítulos que abordan de manera sistemática los aspectos fundamentales del estudio. En el primer capítulo, se realiza una caracterización de las

---

<sup>1</sup> RETIE 2024 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Libro 3. Artículo 3.12.4.3.b

corrientes espurias en líneas de transmisión eléctrica, destacando su origen y su influencia en las mediciones. El segundo capítulo presenta una guía metodológica para la medición de tensiones de paso y contacto, con énfasis en la correcta mitigación de los efectos de las corrientes espurias. En el tercer capítulo, se detallan las mediciones experimentales realizadas en campo, explicando los procedimientos seguidos y los resultados obtenidos. Finalmente, el documento concluye con un análisis de los resultados y conclusiones.

## 1. Caracterización de corrientes espurias en líneas de transmisión eléctrica

En los sistemas de transmisión, las corrientes espurias emergen como un factor crítico que puede distorsionar las mediciones de tensión de paso y contacto en líneas de transmisión (RETIE, 2024). Se ha expuesto que instalaciones industriales con equipos de alta potencia generan corrientes adicionales debido a armónicos y a otros factores que interfieren en la caracterización de estas (J. Solis, E. Prado, y E. Cano, 2007) (M. Morimoto, 2006).

En este contexto, las corrientes espurias son generadas como corrientes transitorias adicionales a la corriente fundamental. Estas corrientes, también conocidas como corrientes parasitarias, tienen la capacidad de circular tanto a través del suelo como a lo largo de las estructuras que se denominan torres de transmisión. Su origen se atribuye a diferencias de potencial entre el sistema de transmisión y la tierra, dando lugar a la formación de campos eléctricos en las áreas circundantes. Además, estas corrientes pueden ser inducidas por campos electromagnéticos que interactúan en los bucles formados entre torres adyacentes, el cable de tierra y la resistencia de puesta a tierra de las propias estructuras (IEEE 81, 2012). El flujo de corriente a través de la tierra es posible gracias a la capacidad inherente del suelo para conducir electricidad. Esta propiedad se debe a la vasta extensión de la tierra y su baja resistividad, lo que genera impedancias mínimas al paso de corriente en un sistema eléctrico. A diferencia de un conductor físico, la corriente en el suelo no está confinada a un espacio específico. No obstante, su distribución está influenciada por el acoplamiento magnético entre la línea de transmisión aérea y las estructuras adyacentes, como las torres de transmisión. En este caso, el campo magnético generado por la corriente en el conductor aéreo induce una atracción que concentra la corriente de retorno en el

suelo, principalmente en el área más cercana a la torre, lo que produce una impedancia finita. Esta interacción electromagnética se rige por principios como la Ley de Ampere y la Ley de Lenz, que explican cómo las corrientes generan campos magnéticos que, a su vez, inducen fuerzas en las corrientes, facilitando su circulación a través del suelo (D. Woodhouse, W. Tocher 7 M. Bale, 2016).

Por lo tanto, el comportamiento de este fenómeno podría significar uno de los posibles orígenes de las corrientes espurias en los sistemas de puesta a tierra que tienen implicaciones directas en el mismo.

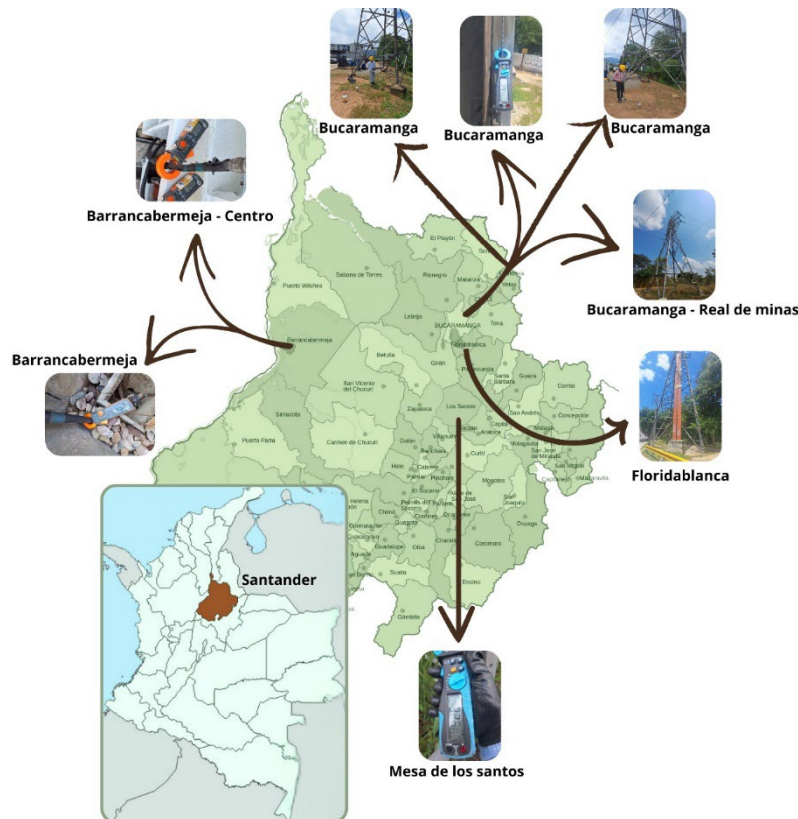
El estudio de las corrientes espurias es importante para garantizar el diseño eficiente, la operación segura y el mantenimiento efectivo de los sistemas de transmisión eléctrica. Para darle seguimiento a este fenómeno se realizaron mediciones preferentemente en la periferia de las instalaciones de puesta a tierra y se consignaron en la Tabla 1. Estos valores son relevantes para las mediciones de tensión de paso y contacto que para llevarse a cabo se requiere inyectar una corriente de prueba utilizando fuentes de alimentación de potencia o generadores de impulsos procurando que la corriente inyectada sea 1% de la corriente para la cual ha sido dimensionada la instalación y no inferior a 50A o bien aplicando una corriente distinta de la frecuencia fundamental (RETIE, 2024). Además de lo mencionado, con el fin de reducir los posibles errores causados por las corrientes circundantes en la malla, se puede aplicar el método de inversión de polaridad (IEEE 81, 2012).

## 1.1 Mediciones de corrientes espurias

Evaluar la magnitud de estas corrientes es importante para anticipar el riesgo al que se está expuesto en el sistema de puesta a tierra de la línea de transmisión. Se realizaron mediciones en el departamento de Santander en las ubicaciones presentadas en la Figura 1, establecimos rangos específicos para identificar las corrientes espurias más comunes, las cuales son inferiores a 22 mA, como se muestra en la Tabla 1 y Figura 2.

### Figura 1

*Distribución geográfica de las mediciones.*

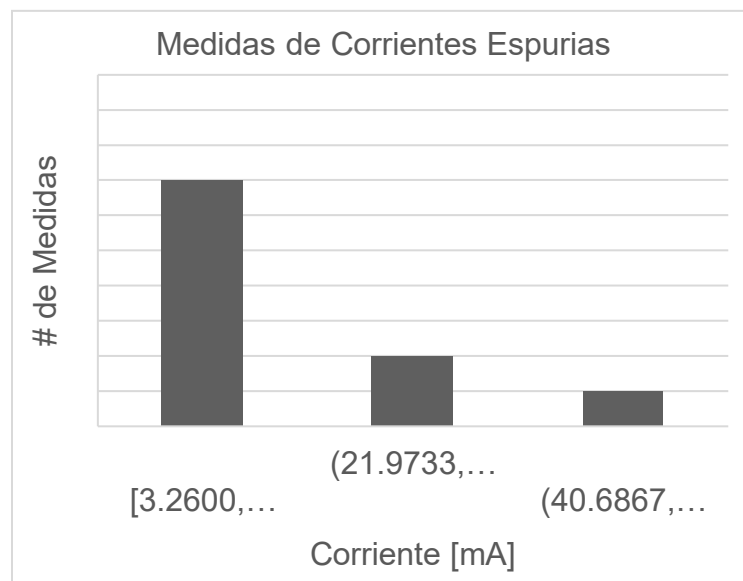


*Nota.* Lugares donde se realizaron las mediciones.

**Tabla 1***Mediciones de Corrientes Espurias en Líneas de Transmisión*

| Corrientes espurias [mA] | Ubicación          |
|--------------------------|--------------------|
| 3,26                     | Mesa de los Santos |
| 4,36                     | Floridablanca      |
| 4,39                     | Piedecuesta        |
| 4,55                     | Floridablanca      |
| 5,48                     | Piedecuesta        |
| 7,2                      | Bucaramanga        |
| 7,3                      | Bucaramanga        |
| 34,5                     | Bucaramanga        |
| 35,5                     | Bucaramanga        |
| 59,4                     | Bucaramanga        |

*Nota.* Consignación de datos obtenidos experimentalmente.

**Figura 2***Histograma de Corrientes Espurias en mA.*

*Nota.* Representación gráfica de mediciones de corrientes espurias obtenidas experimentalmente.

En líneas de transmisión con sistemas de puesta a tierra en presencia de corrientes espurias alrededor la media obtenida en las mediciones experimentales es de 9,5 mA. Esta corriente al entrar en contacto con un ser vivo, generalmente no es perceptible, pero puede inferir en los resultados de la medición de tensión de paso y contacto (NTC 4120, 1997). Por lo tanto, comprender el impacto de las corrientes espurias en la variabilidad de las medidas de tensión de paso y contacto es fundamental puesto que estas variaciones representan un riesgo significativo en las personas adyacentes a estructuras de soporte para líneas de transmisión donde se debe mantener las tensiones dentro de límites seguros. Estas interferencias causadas por corrientes parasitarias pueden llevar a decisiones erróneas por parte del diseñador, haciéndole cuestionar la configuración del sistema de puesta a tierra o incluso sospechar de condiciones ambientales como la resistencia del suelo generando un diagnóstico erróneo.

Para mitigar estos problemas, es fundamental asegurar un diseño y mantenimiento adecuados del sistema de puesta a tierra. Además, es recomendable usar filtros y la implementación de instrumentos de medición de alta precisión capaces de filtrar corrientes parasitarias (Mariscotti, A, 2020) (Qin. Z, Chen. W, Qin. C, Xu. X y Wen. B, 2023).

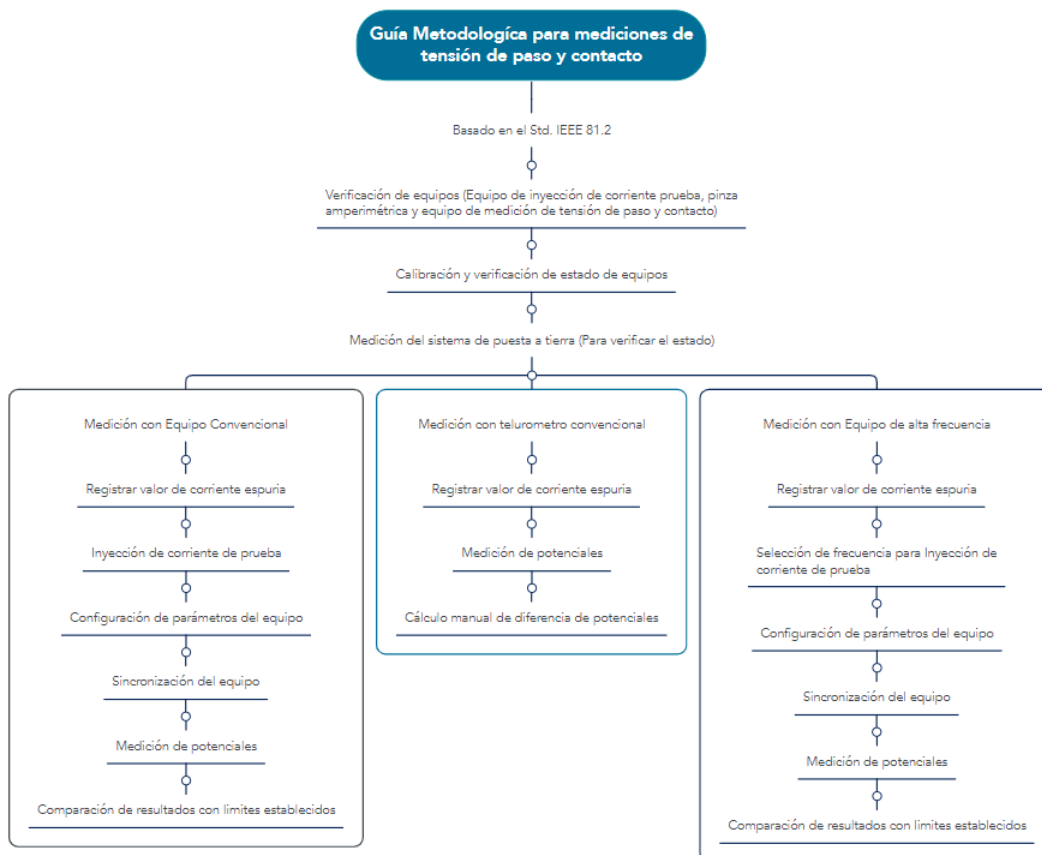
## **2. Guía metodológica para mediciones de tensión de paso y contacto con énfasis en corrientes espurias**

Según la normativa IEEE Std. 81, la cual establece el procedimiento para tensiones de paso y contacto, y cuyo resumen se muestra en la Figura 3, garantiza la seguridad del personal involucrado y la integridad de las mediciones. Durante este proceso, se recomienda el uso de comunicación inalámbricas entre técnicos, así como el uso de múltiples sondas y un GPS (Global

Positioning System) para evitar errores posicionales. Además, se emplean normas referenciales, como se indica en la Figura 4, para asegurar el cumplimiento de los estándares técnicos y operacionales necesarios.

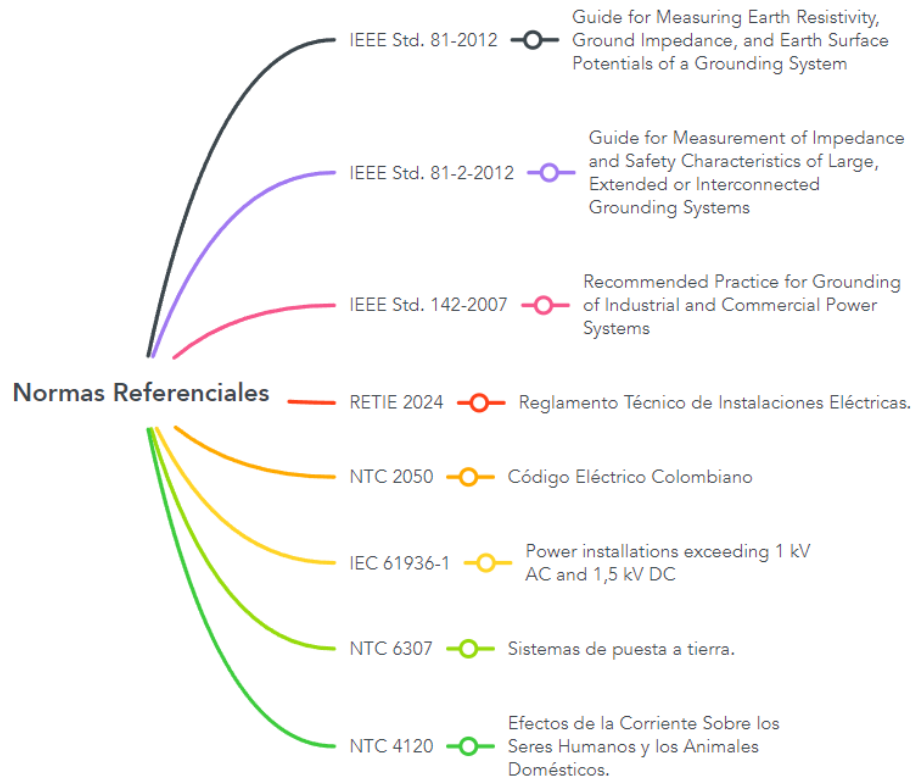
**Figura 3**

*Esquema de proceso para medición de tensión de paso y contacto.*



**Figura 4**

*Esquema de normas referenciales.*



### ***2.1 Con medidor de tensión de paso y contacto con frecuencia estándar***

Para realizar la medición de manera eficiente con un medidor que opere a frecuencia estándar (55Hz), el cual es el más común entre organismos de certificación, es necesario seguir una serie de instrucciones que se describen a continuación.

- a) Al posicionarnos en la torre de transmisión y localizar el conductor del SPT, realizamos la medición de la corriente espuria con la pinza amperimétrica.

Registramos su valor y comprobamos su magnitud, lo cual nos permitirá determinar cuánta corriente es necesaria inyectar para que las mediciones no se vean afectadas por las corrientes parasitarias.

- b) Se inyecta una corriente de prueba con un instrumento o equipo y se hace fluir desde un lugar remoto hasta la red simulando una falla. Esto se realiza por medio de unas sondas ubicadas estratégicamente en el terreno con ayuda de una cinta métrica para ubicarlas correctamente; es importante que las sondas hagan un buen contacto en el suelo. Por lo general las sondas o varillas se introducen unos 150 mm en el suelo mojado; es más que suficiente para que estas realicen un buen contacto, es recomendable usar varillas delgadas puesto que son más fáciles de enterrar y ofrecen una resistencia similar a las de mayor calibre. La resistencia de la sonda auxiliar debe ser lo más baja posible para garantizar que en el sistema se inyecta una corriente de prueba no menor a 50 mA y a frecuencia diferente de 60Hz<sup>2</sup>. Esta corriente puede incrementarse mediante el uso de más sondas puestas y conectadas entre sí en paralelo. Una mayor corriente inyectada mejora la inmunidad contra las corrientes de tierra parásitas.
- c) Se procede a configurar los parámetros de prueba en el equipo de medición de tensión de paso. Entre estos parámetros se encuentra los valores de corriente de falla la cuál es la corriente de falla de la torre de transmisión, la resistencia del cuerpo humano equivalente a 1kΩ y el voltaje máximo permitido que corresponde

---

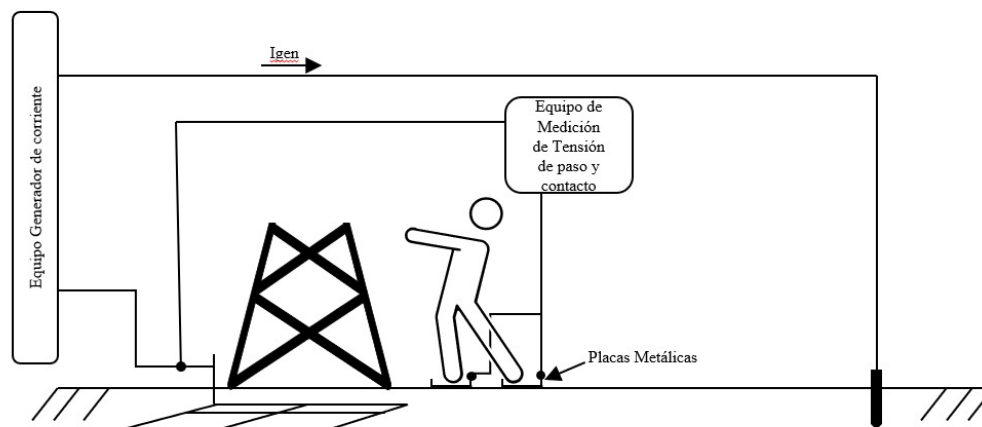
<sup>2</sup> 9.4.3 IEEE 81.2 2012 Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems

a los valores máximos de voltaje permitidos, los cuales son 50V para voltaje de contacto y para el voltaje de paso es de 500V.

- d) Luego se sincronizan el equipo de medición y el equipo de inyección con el fin de que este registre el valor de corriente de prueba con el cual se realizará la medición.
- e) Los potenciales se miden con cables conectados al conductor de tierra o a la estructura de la línea de transmisión. El voltaje escalonado o tensión de paso también se puede obtener midiendo dos voltajes de contacto separados por un metro como se especifica en la Figura 5 y Figura 6 y calculando la diferencia. Para llevar a cabo la medición de las tensiones de paso y contacto se mide inicialmente un voltaje relativo a una sonda de potencial de tierra remota o relativo a la red de tierra de la estructura.

### Figura 5

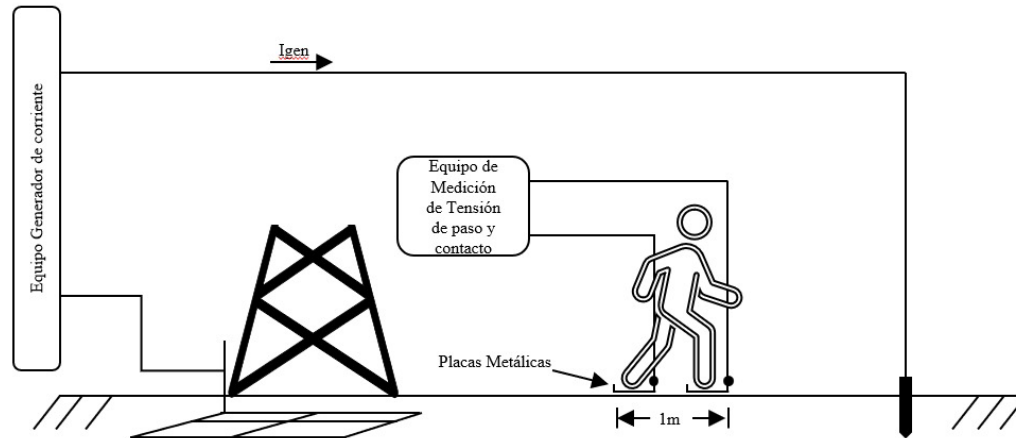
*Esquema de medición de tensión de contacto.*



*Nota.* Adaptado de norma técnica No RA6-014.

**Figura 6**

*Esquema de medición de tensión de paso.*



*Nota.* Adaptado de norma técnica No RA6-014

- f) Por último, los voltajes de contacto y paso obtenidos en la medición se comparan con los límites definidos por el RETIE<sup>3</sup>, que dependen de la corriente tolerable, la resistencia bajo los pies y la duración de la falla.

## 2.2 Con medidor de tensión de paso y contacto de alta frecuencia

Las líneas de alta tensión a menudo están equipadas con un cable de protección, que permite que las corrientes generadas por rayos fluyan hacia la tierra. Al estar todas las torres interconectadas por este conductor, las resistencias de tierra de las estructuras están en paralelo. (J. Solís, E. Prado, y E. Cano, 2007)

<sup>3</sup> RETIE 2024 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Libro 3. Tabla 3.12.1.a

El uso de métodos tradicionales solo permite medir la resistencia de tierra total de la línea de alta tensión. Cuando el número de torres es considerable, este valor global medido puede ser muy bajo. Por lo tanto, medir la resistencia de una torre específica con métodos tradicionales puede proporcionar valores poco precisos, a menos que se aisle el SPT a medir desconectando el cable de guarda, lo que resulta inseguro y laborioso.

El equipo de medición utiliza una corriente de inyección de alta frecuencia de hasta 329 Hz, para la cual la impedancia inductiva del cable de protección es suficientemente alta. Esto minimiza el efecto de las otras torres cercanas, permitiendo que el equipo registre únicamente la resistencia de puesta a tierra de la torre en estudio, incluyendo la resistencia del pie de apoyo correspondiente.

El procedimiento de medición es similar al utilizado con el medidor de tensión de paso y contacto a frecuencia estándar, salvo en el ítem C, en cual se debe definir adicionalmente el parámetro de frecuencia de corriente de prueba.

### **2.3 Con medidor de tierra convencional**

Estos instrumentos funcionan con fuentes que producen corriente alterna de frecuencias distintas de 60 Hz con el propósito de generar corrientes de falla que no se mezclen con la frecuencia de la red. El procedimiento de medición es similar al utilizado con el medidor de tensión de paso y contacto a frecuencia estándar, salvo en el ítem C, donde se realiza la medición de la resistencia del SPT de la línea de transmisión, y con dicho valor obtenido se multiplica por la corriente de falla estima y así obtener un voltaje aproximado.

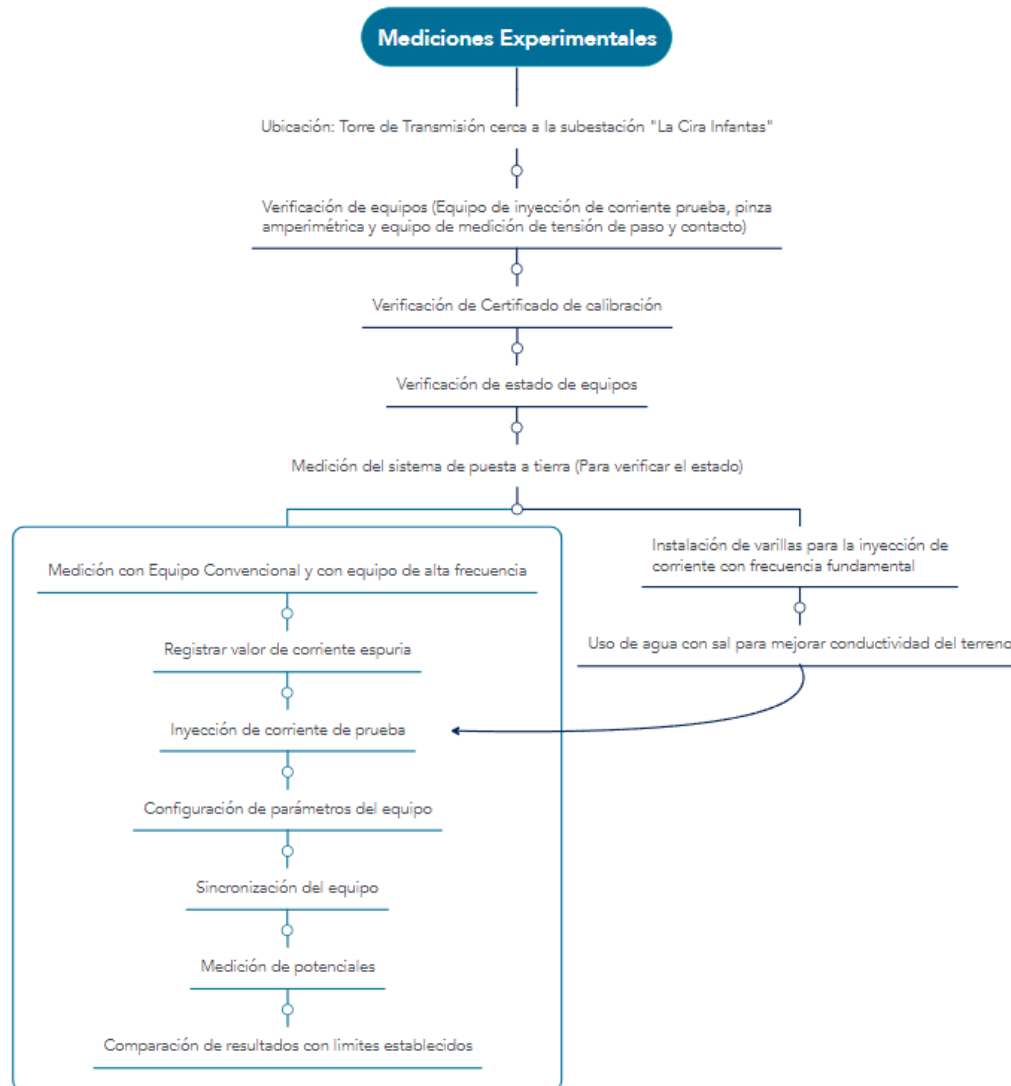
### **3. Mediciones experimentales**

Las mediciones se realizaron en dos líneas de transmisión: una ubicada cerca de la subestación Minas propiedad de la ESSA, y otra en el corregimiento El Centro del municipio de Barrancabermeja conocida como La Cira Infantas. Se utilizaron métodos establecidos por la IEEE Std. 81, junto con otras normas referenciales. Estas intervienen en el proceso de medición para determinar los valores de la resistencia de puesta a tierra, las tensiones de paso y contacto y la influencia de las corrientes espurias en estas mediciones y en el personal.

Antes de realizar las mediciones experimentales, se verificó el estado de los equipos y nos aseguramos que contaran con un certificado de calibración vigente a la fecha. El procedimiento llevado a cabo se encuentra resumido en la Figura 7, proporcionando una visión general del proceso seguido para garantizar la precisión y seguridad durante las pruebas.

**Figura 7**

*Esquema de procedimiento de mediciones experimentales en campo.*



### 3.1 Medición de corrientes espurias

Para realizar todas las mediciones de campo, se registraron las corrientes espurias de cada sistema de puesta a tierra de la línea de transmisión como se muestra en la Figura 8. Esto fue

importante para demostrar como estas corrientes podrían afectar los resultados de las mediciones de tensión de paso y contacto.

### Figura 8

*Medición de corriente espuria con pinza amperimétrica.*



*Nota.* Registro fotográfico de medición.

## 3.2. Medición de resistencia de puesta a tierra.

### 3.2.1. Método de caída de potencial.

Utilizando el equipo Metrel MI 2088, el cual nos permite obtener únicamente el valor resistivo del SPT. Colocamos una sonda de corriente a 50m con respecto al electrodo de tierra de la torre, con esto buscamos alejarnos lo suficiente de la malla que tiene como diagonal 5m para que no altere los valores obtenidos en la medida. El electrodo de potencial fue ubicado al 62% de esta distancia, es decir aproximadamente 31m; dando como resultado el valor mostrado en la Figura 9.

**Figura 9**

*Resultado medición con medidor de tierra convencional.*



*Nota.* Registro fotográfico de Línea de transmisión Minas.

### ***3.2.2. Método de la pendiente.***

En esta medición, el electrodo de corriente se mantuvo a 50 metros y realizamos variaciones en el electrodo de potencial, posicionándolo al 20%, 40% y 60% de la distancia al electrodo de corriente, es decir, a 10, 20 y 30 metros respectivamente. Se registró la resistencia de puesta a tierra en cada distancia, obteniendo los valores R1, R2 y R3 respectivamente como se ilustra en la Figura 10. Posteriormente, calculamos el valor del cambio de la pendiente  $\mu$  lo que resultó en un valor de 1,6.

**Figura 10**

*Resultados de medición para método de la pendiente.*



*Nota.* Registro fotográfico de Línea de transmisión Minas.

Después de determinar el valor de  $\mu$ , consultamos su equivalente y encontramos un valor de 0.334C, esto indica que debemos ubicar el electrodo de potencial al 33.4% de la distancia respecto al electrodo de corriente. Posteriormente, procedimos a realizar nuevamente la medición de resistencia con la nueva posición del electrodo de potencial la cual arroja el resultado de Figura 11, correspondiente al valor más aproximado de resistencia del sistema de puesta a tierra medido.

**Figura 11**

*Resultado final de medición de resistencia.*



*Nota.* Registro fotográfico de Línea de transmisión Minas.

### ***3.2.3 Medición con equipo de alta frecuencia.***

Se realizó la medición con el equipo Metrel MI 3290 en la línea de La Cira Infanta ya que ignora la resistencia de los SPT adyacentes a la torre de transmisión en estudio. Se emplearon los métodos de pendiente y el de la caída de potencial. Además, se realizó la misma medida con el equipo Metrel MI 3288, el cuál es importante mencionar que no es un equipo de alta frecuencia, con el propósito de comparar ambos equipos.

### **3.3. Mediciones de tensión de paso y contacto**

Para simular una condición de falla, inyectamos una corriente de prueba mayor a la corriente espuria registrada previamente en el SPT desde un punto remoto hacia la malla utilizando un equipo en específico. Sin embargo, el equipo no proporcionó la corriente necesaria para realizar la prueba. Para resolver esto, se utilizaron varillas auxiliares conectadas en paralelo y humedecidas con agua con sal para mejorar la conductividad, tal como se muestra en la Figura 12. Esto permitió obtener inyecciones de corrientes más altas.

Durante la inyección de corriente, se conectó un cable de datos entre el equipo generador de corriente y el equipo que nos ayuda a determinar la medición de tensión de paso y contacto. Esto permite transferir los datos de corriente de un equipo al otro para que este realice el cálculo.

**Figura 12**

*Varillas interconectadas.*



*Nota.* Registro fotográfico de Línea de transmisión La Cira.

### ***3.3.1. Medición de tensión de paso***

Para llevar a cabo la prueba, se emplearon chapas de metal diseñadas para simular los pies, como se muestra en la Figura 13, las cuales deben ser cargadas con el peso equivalente a una persona. Alternativamente, se utilizaron un par de pesas metálicas redondas cada una de 20 kg, colocadas a un metro de distancias entre sí, como se ilustra en la Figura 13. Estas pesas se conectaron a cables individuales, y la tensión entre las sondas se midió con el equipo Metrel MI3295M, que tiene una resistencia interna de  $1k\Omega$  para simular la resistencia eléctrica característica del cuerpo humano.

**Figura 13**

*Mediciones de tensión de paso y contacto.*



*Nota.* Registro fotográfico de Línea de transmisión La Cira.

**3.3.2. Medición de tensión de contacto.**

Realizamos esta medición entre un apoyo o “pata” de la estructura metálica y el suelo, con una separación de un metro entre ellas. Posteriormente, colocamos un “caimán eléctrico” en la estructura metálica simulando el contacto de una persona, como se muestra en la Figura 13. Luego, posicionamos una pesa metálica a un metro de distancia y la conectamos mediante un cable. Seguidamente, medimos la tensión de contacto con el equipo con el MI3295M obteniendo el valor de tensión de contacto.

### 3.4. Análisis de resultados

Con los dispositivos expuestos anteriormente en la medición experimental, se obtuvieron los resultados que se encuentran en la Tabla 2, correspondiente a la línea de transmisión de Minas, y en la Tabla 3, correspondiente a la línea de transmisión La Cira Infantas.

**Tabla 2**

*Resumen medición de resistencia en Minas.*

| Equipo  | Caida de Potencial 62% | Método de la Pendiente |
|---------|------------------------|------------------------|
| MI 2088 | 4.31Ω                  | 4.13Ω                  |
| MI 3288 | 4.47Ω                  | 3.98Ω                  |

**Tabla 3**

*Resumen medición de resistencia en La Cira.*

| Equipo  | Caida de Potencial 62% | Método de la Pendiente |
|---------|------------------------|------------------------|
| MI 3290 | 5.9Ω                   | 5.6Ω                   |
| MI 3288 | 3.2Ω                   | 3.03Ω                  |

Estos valores obtenidos se encuentran dentro de los límites establecidos para SPT en líneas de transmisión.<sup>4</sup>

Luego utilizando equipos de medición de tensión de paso y contacto, realizamos inyecciones de corriente a 26°C grados temperatura ambiente con la tierra medianamente seca en la subestación Minas y registramos los valores obtenidos en la Tabla 4.

<sup>4</sup> RETIE 2024 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Libro 3. Tabla 3.12.3.a

**Tabla 4**

*Resumen de mediciones con medidor de tensión de paso y contacto minas.*

| Corriente Inyectada | Tensión de Contacto | Tensión de Paso |
|---------------------|---------------------|-----------------|
| 230 [mA]            | 0,1 V               | 0,0 V           |
| 870 [mA]            | 3,7 V               | 0,1 V           |
| 1630 [mA]           | 3,9 V               | 0,2 V           |

En la torre de transmisión cercana a la subestación La Cira Infantas, se realizaron mediciones utilizando un equipo de inyección de corriente de alta frecuencia y otro convencional, a una temperatura ambiente de 32°C y con el terreno moderadamente seco. Los datos obtenidos se consignaron en las Tablas 5 y 6.

**Tabla 5**

*Resumen de mediciones con medidor de tensión de paso y contacto La Cira con frecuencia diferente a la fundamental.*

| Corriente Inyectada | Tensión de Contacto | Tensión de Paso |
|---------------------|---------------------|-----------------|
| 102 [mA]            | 7,32 V              | 2,5 V           |
| 47 [mA]             | 3,3 V               | 2,5 V           |

**Tabla 6**

*Resumen de mediciones con medidor de tensión de paso y contacto La Cira en frecuencia fundamental.*

| Corriente Inyectada | Tensión de Contacto | Tensión de Paso |
|---------------------|---------------------|-----------------|
| 7,5 [A]             | 42,3 V              | 11,7 V          |

Finalmente, en las mediciones experimentales de medición de tensión de paso y contacto, fue necesario aplicar corrientes de prueba significativamente superiores a los valores de las corrientes espurias indicadas en la Tabla 7. Este enfoque se adoptó porque usar corrientes de prueba inferiores incluyendo las realizadas a 50Hz o 60Hz podría resultar en medidas falsas. De

igual forma si la corriente de inyección es cercana a la corriente espuria, la medición se basaría en una corriente de prueba teórica enviada por el equipo y no la real, la cual tomaría el equipo con el que se lleva a cabo la medición de tensión de paso y contacto en la línea de transmisión. Además, los parámetros de configuración de los equipos influyen en estos resultados. Tomar este tipo de medidas falsas logran que no se dimensione el peligro existente cercano en la línea de transmisión ante una condición de falla y no se puedan implementar medidas preventivas. Por ello, fue necesario seguir los lineamientos del RETIE e IEEE 81.2 para garantizar mediciones experimentales aceptables y se recomienda el uso de equipos especializados como los expuestos en la Tabla 8.

**Tabla 7**

*Resumen de mediciones de corrientes espurias.*

| Equipo  | Línea de Transmisión | Corriente Espuria |
|---------|----------------------|-------------------|
| CMP-200 | Minas                | 59,4 [mA]         |

**Tabla 8**

*Recomendación de equipos*

| Nombre del equipo   | Frecuencia  | Inyección de Corriente | Filtros                                                                         |
|---------------------|-------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Metrel MI 3295      | 55Hz        | Hasta 55A              | N/A                                                                             |
| Metrel MI 3290      | 55 a 329 Hz | Hasta 1A               | N/A                                                                             |
| HT Instruments 2055 | 55Hz        | Hasta 50A              | Filtro DSP para compensación de perturbaciones por ruido                        |
| MPC 5/50 Getest     | 60Hz        | Hasta 50A              | N/A                                                                             |
| Omicron CPC-100     | 15 a 400Hz  | Hasta 800A             | La medición no se ve afectada por las interferencias en la frecuencia de la red |
| Omicron Compano 100 | 16 a 400Hz  | Hasta 800A             | Filtrado Digital altamente selectivo                                            |

El MI 3295 es preferido por empresas certificadoras y operadores de red debido a su balance entre portabilidad, facilidad de uso y capacidad de medición precisa en la mayoría de

aplicaciones. Los equipos que inyectan mayores corrientes suelen ser más voluminosos y requieren fuentes de alimentación robustas, lo que puede dificultar su transporte y uso en áreas remotas como lo son las líneas de transmisión en zonas rurales.

La corriente de prueba moderada del MI 3295 es suficiente para obtener resultados precisos sin generar niveles de interferencia significativos en las mediciones, algo que podría ocurrir con equipos de mayor corriente. Equipos que usan mayores corrientes requieren más energía, lo que puede incrementar los costos de operación y mantenimiento.

#### **4. Conclusiones**

En las mediciones de tensión de paso y contacto en líneas de transmisión eléctrica, las corrientes espurias representan un fenómeno crítico. Identificar su origen es complicado, ya que estas se generan por diversos factores como por ejemplo aspectos constructivos de la línea. Para mitigar su impacto, existen métodos establecidos, como la inyección de corriente con inversión de polaridad y el uso de equipos de medición con filtros o que inyectan corriente a alta frecuencia, lo cual ayuda a evitar distorsiones en los resultados de las mediciones.

Para que las mediciones de tensión de paso y contacto se realicen con éxito, es fundamental tener en cuenta la magnitud y relevancia de las corrientes parasitarias. Seguir un procedimiento meticuloso ayuda a evitar errores humanos y en la medición. El uso de agua salada o la instalación de suficientes electrodos son prácticas que mejoran la corriente de inyección de prueba utilizada para la medición. Por otro lado, al emplear un equipo de inyección de alta frecuencia, es posible utilizar corrientes de inyección de prueba más bajas, lo que facilita el proceso de medición.

Para realizar el procedimiento de medición de tensión de paso y contacto, es fundamental evaluar previamente el estado del sistema de puesta a tierra, el cual depende en gran medida de la resistividad del terreno, ya que esta determinará la facilidad para la inyección de la corriente de prueba.

Realizar mediciones con equipos que inyecten corrientes a alta frecuencia evita la necesidad de desconectar el cable de guarda de la línea de transmisión en estudio, Esto asegura que el valor real de la resistencia de la torre sea el captado por el dispositivo. Además, en estas frecuencias la resistencia de puesta a tierra fue mayor en la línea de transmisión de La Cira en un 45.76% en comparación de otras mediciones a bajas frecuencias. Esto ocurre porque a frecuencias altas el dispositivo incluye componentes inductivos y capacitivos en la impedancia.

La configuración de los parámetros del equipo de medición de tensión de paso y contacto desempeña un papel crucial en este proceso. Valores de referencia como la inyección de corriente, la frecuencia de inyección y la corriente de falla de la línea afectan significativamente los resultados de las mediciones de tensión de paso y contacto, tal como se evidencia en el capítulo 3 de este documento. Por lo tanto, es fundamental seleccionar parámetros coherentes que estén alineados con métodos avalados por normas nacionales o internacionales.

Para realizar el procedimiento de medición de tensión de paso y contacto, es fundamental evaluar previamente el estado del sistema de puesta a tierra, el cual depende en gran

medida de la resistividad del terreno, ya que esta determinará la facilidad para la inyección de la corriente de prueba.

La realización de estas mediciones experimentales permite comprender la importancia de las corrientes espurias en las medidas de tensión de paso y contacto, conservando las buenas prácticas a la hora de llevar a cabo este tipo de actividades. Adquiriendo conocimiento sobre los requerimientos para tener mediciones precisas. Sería enriquecedor continuar con el estudio en cuestión en líneas de transmisión de extra alta tensión con el fin de respaldar los procedimientos de medición que tienen las empresas certificadoras del país.

### Referencias Bibliográficas

- C. A. Charalambous, A. Demetriou, & N. D. Kokkinos. (2015). Impact of photovoltaic-oriented DC stray current corrosion on large-scale solar farms' grounding and third-party infrastructure : Modeling and assessment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 5421-5430. doi :10.1109/TIA.2015.2416241
- D. J. Woodhouse, W. J. V. Tocher and M. J. Bale, "How does current flow in the ground?," 2016 Down to Earth Conference (DTEC), Hunter Valley, NSW, Australia, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/DTEC.2016.7731304.
- Hoger, M., Regula, M., Bracinik, P., & Otcenasova, A. (2022). Influence of high voltage power lines on the propagation of stray currents from DC traction. *2022 ELEKTRO*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO53996.2022.9803410>
- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems - Redline," in *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) - Redline*, vol., no., pp.1-215, 30 Nov. 2007.
- IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) : IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. (2012). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>
- Jinliang He, Rong Zeng, Yanqing Gao, Youping Tu, Weimin Sun, Jun Zou, & Zhicheng Guan. (2003). Seasonal influences on safety of substation grounding system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), 788-795. doi :10.1109/TPWRD.2003.813895
- L. Chen, K. Huang, K. Wei, D. Gao, Q. Peng, & S. Lin. (2022). Study on the potential distribution characteristics of substation grounding grid considering stray current. Paper presented at

- the 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 1284-1289. doi :10.1109/EI256261.2022.10116337
- Mariscotti, A. (2020). Stray Current Protection and Monitoring Systems: Characteristic Quantities, Assessment of Performance and Verification. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(22), 6610-. <https://doi.org/10.3390/s20226610>
- Ministerio de Minas y Energía, Santa fe de Bogotá D.C., (2024). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).
- M. Morimoto. (2006). Reduction of high frequency leakage current from PWM inverter-motor system at the "integrated grounding system". Paper presented at the Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. 4 pp. doi :10.1109/APEC.2006.1620538
- P. K. Jha, M. S. Hada and V. Kumar, "Spurious Current-Induced Breaker Failure Protection in the 220kV DMT Bus Switching Scheme– A Case Study from Indian Power Sector," 2023 International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering (ICEMCE), Madurai, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMCE57940.2023.10434023.
- Qin, Z., Chen, W., Qin, C., Xu, X., & Wen, B. (2023). Spurious currents suppression by accurate difference schemes in multiphase lattice Boltzmann method. *Computers & Fluids*, 261, 105917-. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2023.105917>
- Solis-Chaves, Juan. (2007). Estudio de Interconectividad de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) por medio del ATP-Draw. SICEL 2007.