

**MEDICIÓN INDIVIDUAL DE PUESTAS A TIERRA EN ESTRUCTURAS PARA
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENERGIZADAS O DES-
ENERGIZADAS CON LA BAJANTE ACOPLADA AL CABLE DE GUARDA**

**ANDRÉS FABIÁN LATORRE VESGA
JUAN PABLO MORENO GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELÉCTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

**MEDICIÓN INDIVIDUAL DE PUESTAS A TIERRA EN ESTRUCTURAS PARA
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENERGIZADAS O DES-
ENERGIZADAS CON LA BAJANTE ACOPLADA AL CABLE DE GUARDA**

**ANDRÉS FABIÁN LATORRE VESGA
JUAN PABLO MORENO GÓMEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
CIRO JURADO JEREZ
Ingeniero Electricista**

**Tutor
ISMAEL GRISALES ÁVILA
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELÉCTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

Dedico este trabajo a mis padres, **Gerardo** y **Miriam**, y a mi novia **Andrea**, por su constante apoyo y por la alegría de que formen parte de mi vida.

Andrés Fabián Latorre Vesga

A mi mamá, **Miriam**, mi abuela, **Socorro** y mi hermano, **Jaime**, por la confianza y el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de toda la carrera.

Juan Pablo Moreno Gómez

Agradecemos a la **Universidad Industrial de Santander**, y en particular a la **E³T**, por apoyar este tipo de proyectos, a la empresa **J.E. Jaimes Ingenieros S.A** por permitir realizar este estudio en uno de sus proyectos y por brindar todas las herramientas necesarias para el buen desarrollo del trabajo.

Igualmente agradecemos a nuestro director de proyecto, el ingeniero **Ciro Jurado**, por sus consejos y acompañamiento, al ingeniero **Jaime Rivera**, director de obra en el proyecto donde se realizó la práctica, por sus enseñanzas y buen trato, al ingeniero **Fabio Prieto**, por su colaboración.

Hacemos un especial agradecimiento al doctor **Gerardo Latorre** y al periodista **Jaime Moreno**, por su constante apoyo, colaboración, acompañamiento y buen ejemplo, no solo en la realización de este trabajo de grado sino también a lo largo de nuestro crecimiento como personas.

CONTENIDO

1. Marco contextual	15
2. Diseño de la puesta a tierra y consideraciones adicionales	16
3. Descripción de la metodología utilizada	18
4. Resultados	19
5. Modelo eléctrico equivalente de la línea para el telurómetro de pinza	25
6. Modelo teórico con base en la resistividad del terreno	28
7. Análisis de tensiones de paso y de contacto	33
8. Análisis técnico y financiero.....	35
9. Análisis de resultados.....	44
10. Conclusiones	50
11. Observaciones	53
Referencias	55
Anexos	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistencias de puesta a tierra.....	19
Tabla 2. Porcentajes de diferencia	22
Tabla 3. Valores promedio, máximo y mínimo para la Medición 3.....	23
Tabla 4. Resistencias de Thévenin y porcentajes de error teórico del telurómetro de pinza	27
Tabla 5. Resistividad del terreno en la línea Jaguar	28
Tabla 6. Resistencia de puesta a tierra calculada a partir de k de diseño y %ER con respecto a la medición 5.....	31
Tabla 7. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J7	33
Tabla 8. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J15	34
Tabla 9. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J24	34
Tabla 10. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J37	34
Tabla 11. Pros y contras para los tres métodos.....	35
Tabla 12. Recursos, costos y consideraciones adicionales para la medición con cada método	40
Tabla 13. Costos de alquiler, compra y tiempos de medición para cada método.....	42
Tabla 14 Porcentajes de cambio de la R con el tiempo.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de puesta a tierra.....	16
Figura 2. Porcentajes de error	22
Figura 3. Porcentaje de error Vs. distancia PAT.....	24
Figura 4. Modelo eléctrico troncal Jaguar.....	25
Figura 5. Cálculo de resistencias de Thévenin.....	26
Figura 6. R convencional desacoplado Vs resistividad del terreno.....	32
Figura 7. Valor del alquiler vs el número de días alquilado para cada equipo.....	43
Figura 8. Valor de la medición por puesta a tierra medida para cada equipo.....	43
Figura 9. Muestra típica de la puesta a tierra construida.....	58
Figura 10. Distribución Gaussiana de ER1 (1-5).....	59

LISTA DE ANEXOS

<u>Anexo 1. Análisis de cambio de la resistencia de puesta a tierra con el tiempo.....</u>	56
<u>Anexo 2. Muestra típica de puesta a tierra construida.</u>	58
<u>Anexo 3. Distribución gaussiana de ER1(1-5).....</u>	59
<u>Anexo 4. Informe medición convencional y no convencional realizado por autores como documento interno de trabajo.</u>	59
<u>Anexo 5. Informe de medición de tensiones de paso y de contacto.</u>	59
<u>Anexo 6. Manual para la medición individual de resistencia de puesta a tierra en estructuras de líneas de transmisión acopladas por el cable de guarda.</u>	59
<u>Anexo 7. Formatos de registro de mediciones</u>	59
<u>Anexo 8. Registro fotográfico de mediciones realizadas en campo</u>	59

RESUMEN

Título: MEDICIÓN INDIVIDUAL DE PUESTA A TIERRA EN ESTRUCTURAS PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA ENERGIZADAS O DES-ENERGIZADAS CON LA BAJANTE ACOPLADA AL CABLE DE GUARDA.*

Autores: Juan Pablo Moreno Gómez, Andrés Fabián Latorre Vesga.**

Palabras clave:

Medición de resistencia de puesta a tierra, telurómetro de alta frecuencia, telurómetro de pinza, RETIE.

Descripción:

Las limitadas opciones que plantea la normatividad colombiana, específicamente el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), para verificar el valor de las puestas a tierra en estructuras para líneas de transmisión que ya se encuentran interconectadas a través del cable de guarda, es una de las principales razones que dieron motivación a la realización del presente trabajo de grado.

A partir de una serie de hipótesis que podrían dar una eventual solución a la problemática descrita, se diseñó un procedimiento experimental que se llevó a cabo en dos líneas diseñadas para operar a 34.5 kV y que contaban con las características necesarias para realizar el experimento. En él se realizaron medidas utilizando las metodologías recomendadas por el RETIE, una metodología planteada por los autores y una más planteada por la empresa que construyó las líneas, la cual hizo posible la realización de todo el proceso experimental.

Con las experiencias recogidas en campo y la comparación de los datos obtenidos con cada método, se analizaron las ventajas y desventajas de cada uno, desde el punto de vista técnico y financiero, con lo cual se concluye que la propuesta de los autores, es la metodología idónea para realizar mediciones de puesta a tierra en líneas de transmisión con el cable de guarda acoplado.

* Proyecto de grado en la modalidad práctica empresarial.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Ing. Ciro Jurado Jerez. Tutor: Ing. Ismael Grisales Ávila.

ABSTRACT

Title: INDIVIDUAL MEASUREMENT OF GROUNDING RESISTANCE OF TOWERS FOR ENERGIZED OR DE-ENERGIZED ELECTRICAL TRANSMISSION LINES WITH THE OVERHEAD GROUND WIRE CONNECTED.*

Authors: Juan Pablo Moreno Gómez, Andrés Fabián Latorre Vesga.**

Keywords:

Ground resistance test, high-frequency earth tester, clamp earth tester, RETIE.

Description:

The limited choices stated by the Colombian regulations, specifically, the “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)”, in order to measure the ground resistance of towers for transmission lines which are already connected by the overhead ground wire, as well as the difficulties associated to the current measurement methodologies, were the main reasons that motivated this final undergraduate project.

Starting from several hypothesis that could lead to the eventual solution of the problem previously described, the authors designed an experimental procedure which was carried out in two 34.5 kV transmission lines whose features were ideal for the experiment. Measures of grounding resistance were performed using the methodologies proposed by RETIE, by the authors and another one proposed by the company which built the transmission lines and made the experimental procedure possible.

Thanks to the experiences collected through the fieldwork, and the analysis of the data obtained from the measures, the advantages and disadvantages related to each method could be established. The study was made having into account not only technical aspects but also the financial point of view and led to conclude that the authors approach is the most appropriate method to use in transmission lines without disconnecting the overhead ground wire.

* Undergraduate degree project in business practice mode.

** Physics and mechanics engineering faculty, Electric, Electronic and Telecommunications engineering school.
Director: Ing. Ciro Jurado Jerez. Tutor: Ing. Ismael Grisales Ávila.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas los sistemas de puesta a tierra han venido cobrando importancia, gracias a la continua expansión de los sistemas de potencia eléctrica y, sobretodo, de los sistemas de comunicaciones. Colombia no es ajena a esta situación, como un reflejo del desarrollo económico que ha tenido en los últimos años.

Las puestas a tierra son de gran importancia en lo referente a la protección de los equipos y, sobre todo, con respecto a la seguridad de las personas. Un sistema de puesta a tierra que no cumpla con las normas aplicables, hará que el sistema eléctrico, en este caso las líneas de transmisión, tengan una respuesta inadecuada ante una falla eléctrica o una descarga atmosférica. En sistemas con puestas a tierra defectuosas, las fallas señaladas generarán sobretensiones que pueden comprometer el aislamiento y la vida útil de los equipos. Incluso producen accidentes eléctricos que pueden causar lesiones de diferente nivel de gravedad e incluso la muerte al personal técnico que se encuentre operando en el sistema. Asimismo, personas que casualmente se encuentren cercanas a la vecindad de las instalaciones de la puesta a tierra se pueden ver afectadas.

Teniendo en cuenta que el RETIE es un reglamento de obligatorio cumplimiento, cuando un interventor va a recibir obras de construcción de líneas eléctricas debe realizar las mediciones de resistencia de puesta a tierra en cada una de las torres que conforman la línea de transmisión [1]. Es usual que el cable de guarda ya esté conectado y que el interventor quiera que se desconecte cada torre. Debido a que este proceso consume gran cantidad de tiempo e implica poner en riesgo la vida del personal técnico que se asigne para la ejecución de esta tarea, se propone, mediante este estudio, evaluar una metodología que avale el hecho de hacer la medición de la resistencia de puesta a tierra con la bajante acoplada al cable de guarda de manera sencilla y segura.

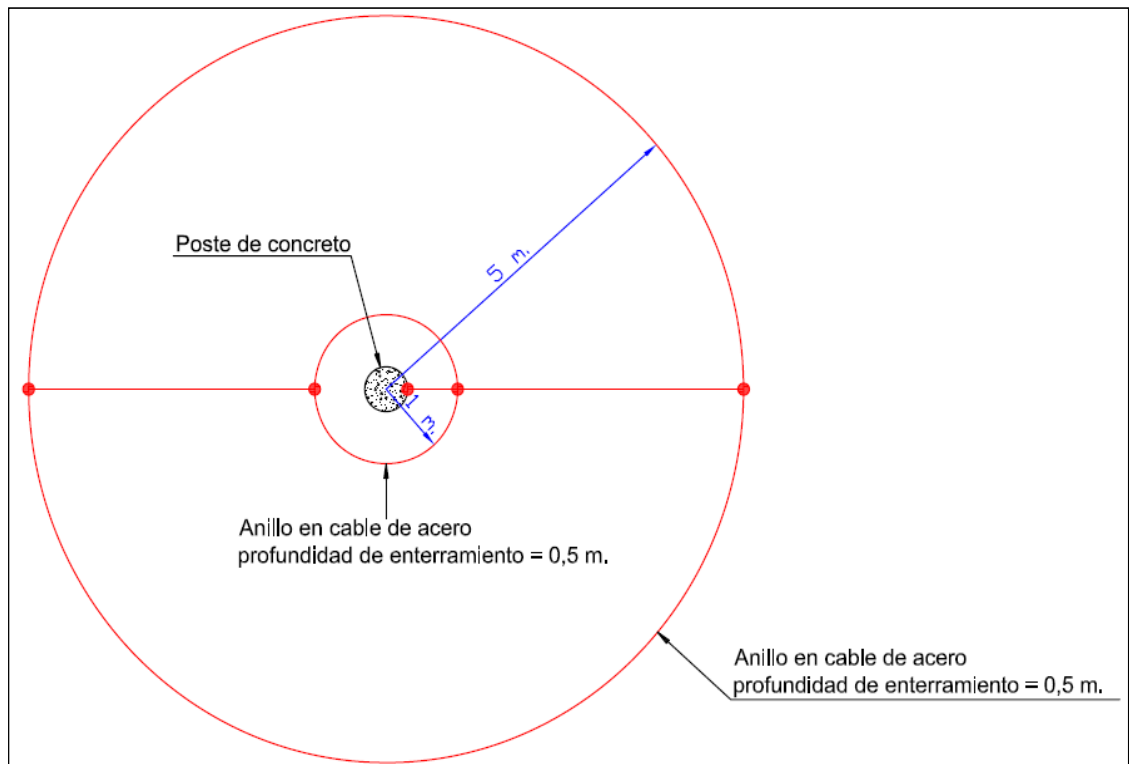
1. MARCO CONTEXTUAL

Las pruebas realizadas para este estudio se llevaron a cabo en dos líneas diseñadas para operar a 34,5 kV. En una de las líneas, llamada línea troncal Jaguar, de menos de 4 km de longitud, se tiene que 15 de las 38 estructuras que la conforman están aterrizadas, cada 240 m en promedio. Para esta línea se realizó la medición en la totalidad de las estructuras aterrizadas. Por su parte, la línea troncal Caracara tiene poco más de 20 km de longitud y en ella se hicieron pruebas en 3 estructuras aterrizadas.

2. DISEÑO DE LA PUESTA A TIERRA Y CONSIDERACIONES ADICIONALES

El estudio de resistividad previo al diseño y posterior construcción de las líneas [7], reveló que las resistividades presentes en el terreno donde se construirían las líneas son considerablemente elevadas, del orden de los kilo ohms metro ($k\Omega\cdot m$). En consecuencia, se esperaba que la resistencia de puesta a tierra de las estructuras no cumpliera con lo recomendado por el RETIE, en su artículo 15.4 [1]. Sin embargo, se aseguró que se cumplieran las tensiones de paso y de contacto, tal como la normativa lo exige. En la Figura 1 se presenta la configuración diseñada para las puestas a tierra de las líneas estudiadas.

Figura 1. Diseño de puesta a tierra.



Unión Temporal Altillanura [6].

Los resultados y análisis de las tensiones de paso y de contacto se presentan en la sección 8 del documento. Sin embargo, teniendo en cuenta que este tema va más allá del alcance de este trabajo, el procedimiento para obtener los resultados se deja a consulta del lector [Ver anexo 5.].

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

Con el propósito de obtener una adecuada comparación entre los métodos de medida y de establecer la forma correcta de hacer cada medición, se realizaron las siguientes mediciones para cada estructura:

- resistencia de puesta a tierra con el telurómetro de pinza y la bajante acoplada.
- resistencia de puesta a tierra con el telurómetro de alta frecuencia y la bajante acoplada.
- resistencia de puesta a tierra con el telurómetro de baja frecuencia y la bajante acoplada.
- resistencia de puesta a tierra con el telurómetro de alta frecuencia y la bajante desacoplada.
- resistencia de puesta a tierra con el telurómetro de baja frecuencia y la bajante desacoplada.

Igualmente, para llevar a cabo un estudio analítico se realizaron mediciones de la resistividad del terreno en las cercanías de cada estructura aterrizada de la línea troncal Jaguar. Para ello se aplicó el método de Wenner [11], [12].

En el Anexo 4 y en [14] se puede consultar una descripción detallada de los principios de funcionamiento de los equipos. Igualmente, la forma de utilizarlos y el procedimiento a seguir, para un adecuado proceso de medición, se puede consultar en el anexo 6.

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los valores de resistencia de puesta a tierra de las estructuras de la línea troncal Jaguar y de las tres primeras mediciones de la línea troncal Caracara.

Como se observa en la Tabla 1, se asignaron nombres a las mediciones. De esta forma, al referirse a la medición con el telurómetro de pinza se dirá medición 1. Igualmente, la marcación de las estructuras para la línea Jaguar comienza por la letra “J” y para la línea Caracara por la letra “C”.

En la Figura 2 se presentan los resultados de los porcentajes de error de las mediciones 1 a la 4, con respecto a la 5. Se toma la medición 5 como referencia, ya que es la que normalmente se realiza para caracterizar una puesta a tierra y es recomendada por el RETIE. La similitud o diferencia entre los demás métodos de medición con respecto a la medición 5 o método convencional, determinará la viabilidad técnica de su implementación. Los porcentajes de error se calcularon aplicando la ecuación (1).

$$\%ER1 = \frac{|Valor - Valorreferencia| * 100}{Valorreferencia} \quad (1)$$

Tabla 1. Resistencias de puesta a tierra

			Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
Fecha	Estructura	Terreno	R pinza Ω	R 25 kHz acoplado Ω	R convencional acoplado Ω	R 25 kHz desacoplado Ω	R convencional desacoplado Ω

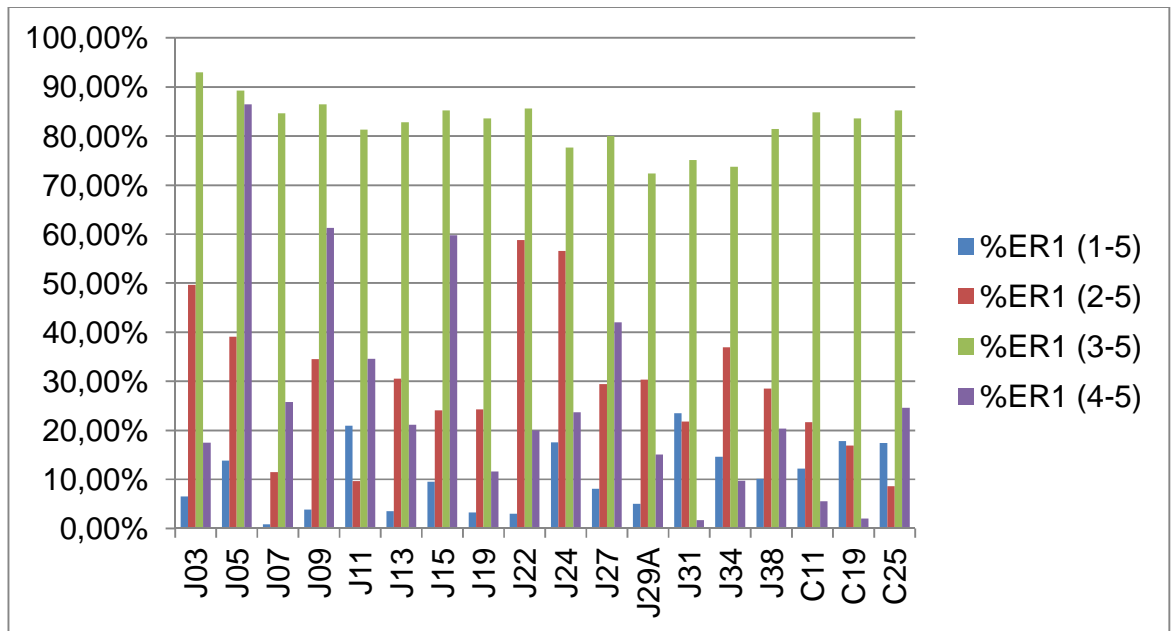
12-oct	J03	Seco	152,90	82,40	11,54	134,90	163,60
12-oct	J05	Seco	143,40	175,3	13,48	235,00	126,00
12-oct	J07	Seco	95,05	83,40	14,46	118,50	94,20
12-oct	J09	Seco	143,60	186,1	18,73	223,00	138,30
12-oct	J11	Seco	63,97	58,00	9,90	71,20	52,90
12-oct	J13	Seco	108,20	72,60	18,00	126,60	104,50
12-oct	J15	Seco	150,10	170,1	20,30	219,00	137,10
12-oct	J19	Seco	81,43	63,80	13,83	94,00	84,20
12-oct	J22	Seco	114,50	45,80	16,00	88,90	111,10
12-oct	J24	Seco	87,71	46,20	23,75	81,20	106,40
12-oct	J27	Semi humed o	56,43	79,50	12,28	87,20	61,40

12- oct	J29 A	Seco	53,56	39,30	15,58	47,90	56,40
12- oct	J31	Seco	53,47	54,70	17,39	71,10	69,90
13- oct	J34	Seco	34,41	25,40	10,60	36,40	40,30
13- oct	J38	Seco	40,96	32,60	8,47	54,90	45,60
13- oct	C11	Seco	166,30	148,4	28,71	199,90	189,40
13- oct	C19	Seco	129,1	130,6	25,87	153,90	157,10
13- oct	C25	Seco	127	140,6	22,80	191,80	153,90
Fuente Autores							

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los porcentajes de diferencia entre las mediciones 1 y 2 y entre las mediciones 2 y 4. Los valores mostrados en la Tabla 2 se calcularon utilizando las ecuaciones (2) y (3). Se utiliza la ecuación (3) para enfatizar cuál de los valores, si el 2 ó el 4, fue mayor.

$$\%ER2 = \frac{|Valor1 - Valor2| * 100}{(Valor1 + Valor2)/2} \quad (2) \quad [13]$$

Figura 2. Porcentajes de error



Autores.

$$\%ER3 = \frac{(\text{Valor2} - \text{Valor4}) * 100}{(\text{Valor2} + \text{Valor4})/2} \quad (3) \quad [17]$$

En la Tabla 3 se presentan los valores promedio, máximo y mínimo de la medición 3, es decir, la medición de resistencia de puesta a tierra con el telurómetro convencional y la bajante acoplada al cable de guarda.

Tabla 2. Porcentajes de diferencia

Estructura	%ER2 (1-2)	%ER3(2-4)
J03	59,92%	-48,32%
J05	20,02%	-29,10%
J07	13,06%	-34,77%

J09	25,78%	-18,04%
J11	9,79%	-20,43%
J13	39,38%	-54,22%
J15	12,49%	-25,13%
J19	24,28%	-38,28%
J22	85,71%	-63,99%
J24	62,00%	-54,95%
J27	33,94%	-9,24%
J29A	30,71%	-19,72%
J31	2,27%	-26,07%
J34	30,13%	-35,60%
J38	22,73%	-50,97%
C11	11,38%	-29,57%
C19	1,16%	-16,38%
C25	10,16%	-30,81%
Fuente Autores		

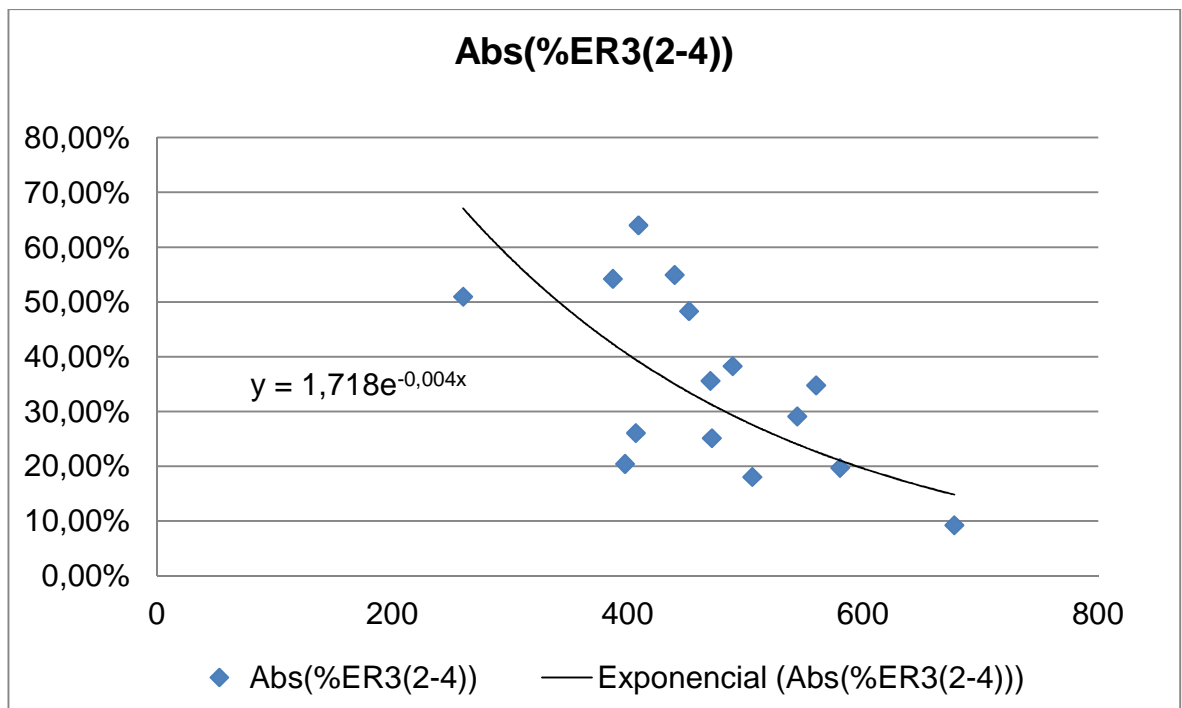
Tabla 3. Valores promedio, máximo y mínimo para la Medición 3

	Promedio Ω	Max Ω	Min Ω

Troncal JGR	14,95	23,75	8,47
Troncal CC	25,79	28,71	22,80
Fuente	Autores		

En la Figura 3 se observa el comportamiento del valor absoluto del porcentaje de error de las mediciones 2-4, con respecto a la suma de distancias vistas desde cada estructura hacia la siguiente puesta a tierra (distancia PAT).

Figura 3. Porcentaje de error Vs. distancia PAT.

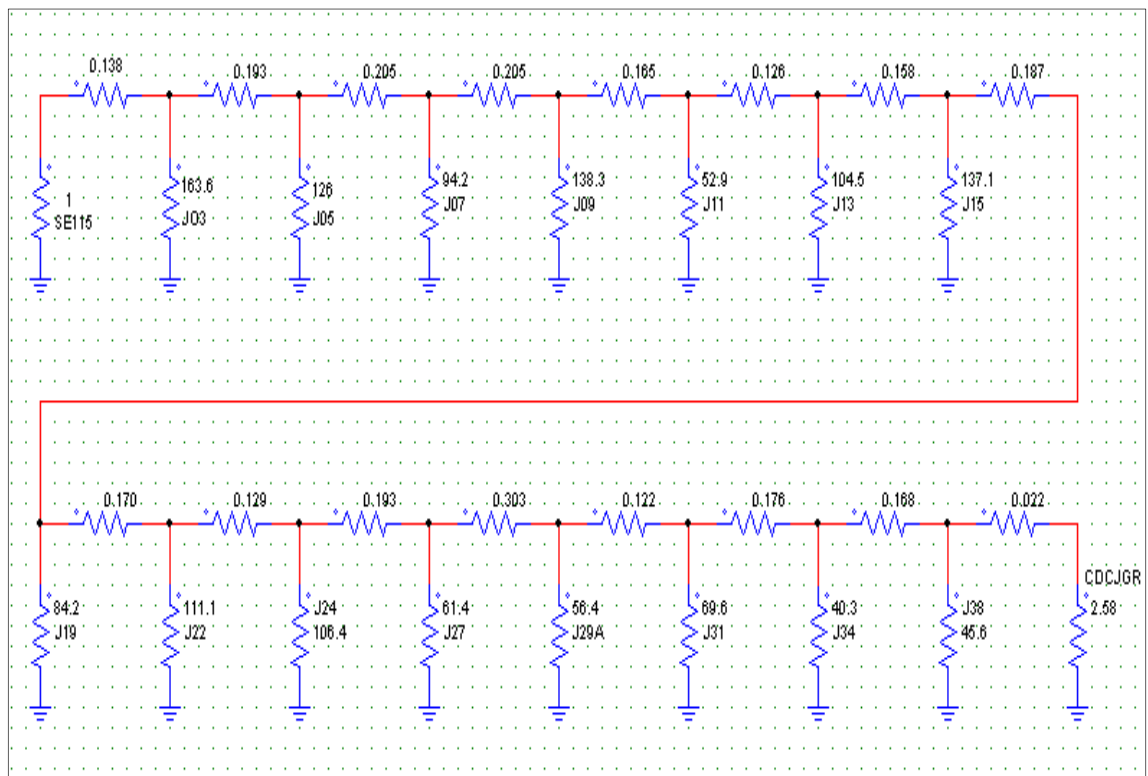


Autores.

5. MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LA LÍNEA PARA EL TELURÓMETRO DE PINZA

Teniendo en cuenta que el principio de funcionamiento del telurómetro de pinza conlleva a que las mediciones tengan un porcentaje de error, debido a que éste mide la resistencia de puesta a tierra de cada estructura más la resistencia equivalente vista desde la estructura en la que se realiza la medida (Ver anexo 4.), se plantea un modelo eléctrico para la Troncal Jaguar (Figura 4). El modelo permite calcular el valor de las mencionadas resistencias equivalentes. Dicho modelo se plantea a partir de las resistencias obtenidas de la medición convencional y de las resistencias del cable de guarda; calculadas con los datos proporcionados por el fabricante, las distancias de cada vano y teniendo en cuenta que dicha línea cuenta con doble cable de guarda.

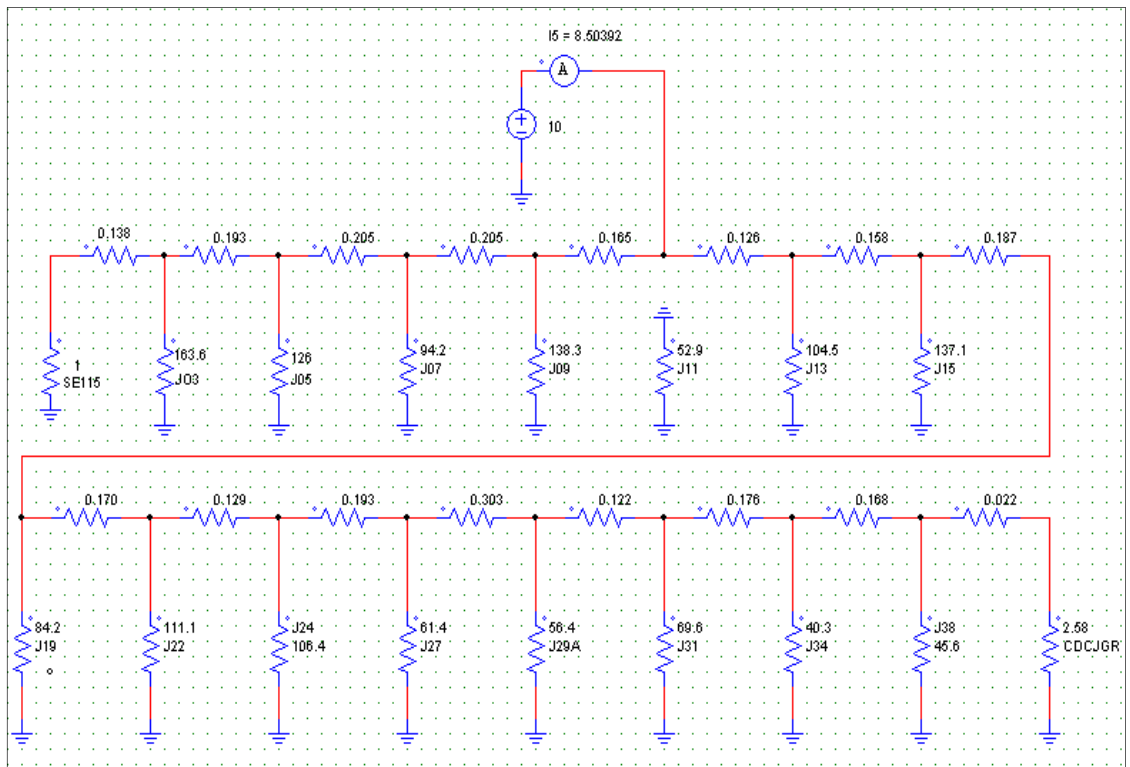
Figura 4. Modelo eléctrico troncal Jaguar



Autores.

Con el modelo planteado se calculan resistencias de Thévenin vistas desde cada estructura, conectando una fuente de tensión y simulando el circuito para encontrar la corriente y posteriormente calcular las resistencias a partir de la Ley de Ohm. En la figura 5 se esquematiza este procedimiento.

Figura 5. Cálculo de resistencias de Thévenin



Autores.

En la tabla 4 se presentan las resistencias de Thévenin vistas desde cada una de las estructuras de la troncal Jaguar y el porcentaje de error producido al sumar dichas resistencias a cada una de las resistencias halladas de forma convencional.

Tabla 4. Resistencias de Thévenin y porcentajes de error teórico del telurómetro de pinza

Estructura	Tensión V	Corriente A	R Thevenin Ω	Resistencia método convencional Ω	Resistencia equivalente Pinza Ω	Error teórico pinza
J03	10	11,6	0,86	163,6	164,46	0,52%
J05	10	10,45	0,96	126	126,96	0,75%
J07	10	9,57	1,04	94,2	95,24	1,10%
J09	10	8,99	1,11	138,3	139,41	0,80%
J11	10	8,5	1,18	52,9	54,08	2,17%
J13	10	8,35	1,2	104,5	105,7	1,13%
J15	10	8,11	1,23	137,1	138,33	0,89%
J19	10	7,84	1,28	84,2	85,48	1,49%
J22	10	7,72	1,3	111,1	112,4	1,15%
J24	10	7,62	1,31	106,4	107,71	1,22%
J27	10	7,47	1,34	61,4	62,74	2,13%
J29A	10	7,41	1,35	56,4	57,75	2,34%
J31	10	7,45	1,34	69,9	71,24	1,88%
J34	10	7,38	1,36	40,3	41,66	3,25%
J38	10	7,44	1,34	45,6	46,94	2,86%
Fuente	Autores					

6. MODELO TEÓRICO CON BASE EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

En la Tabla 5 se presentan los valores de resistencia del terreno en las cercanías de cada estructura con puesta a tierra de la línea troncal Jaguar, así como el valor de la resistividad para cada caso, obtenida aplicando la ecuación (4).

Tabla 5. Resistividad del terreno en la línea Jaguar

Fecha	Estructura	(Re)Resistencia de Tierra Ω	(ρ)Resistividad Ωm
01-nov	J03	254,10	3193,11
01-nov	J05	324,00	4071,50
01-nov	J07	203,60	2558,51
01-nov	J09	222,30	2793,50
01-nov	J11	171,30	2152,62
01-nov	J13	45,70	574,28
01-nov	J15	374,00	4699,82
01-nov	J19	160,40	2015,65
01-nov	J22	159,20	2000,57
01-nov	J24	141,10	1773,11
01-nov	J27	104,00	1306,90
01-nov	J29A	70,50	885,93

01-nov	J31	143,30	1800,76
01-nov	J34	168,40	2116,18
01-nov	J38	128,50	1614,78
Fuente	Autores		

$$\rho = 2 * \pi * a * R_e \quad (4)$$

Donde:

ρ - es la resistividad del terreno Ωm .

R_e - es la resistencia de tierra Ω .

a – es la distancia de separación entre electrodos auxiliares, en este caso corresponde a 2 m.

Según el diseño de puesta a tierra de las estructuras de las líneas realizado por la empresa “SPT ingeniería”, apoyado en el estudio de resistividad del terreno realizado por la empresa “Unión Temporal Altillanura”, el valor más grande de resistividad para la línea troncal Jaguar es 1 404 Ωm . Dado que el diseño se hace para la condición más desfavorable, se tomó ese valor para realizar el diseño de las puestas a tierra de las estructuras de la línea troncal Jaguar. Debido a que este valor es considerablemente alto, de antemano se sabía que un diseño económicamente viable no cumpliría con las recomendaciones del RETIE. Por tanto, el diseño se enfocó al cumplimiento de las tensiones de paso y de contacto. Con la configuración mostrada en la Figura 1 de la sección III de este documento, se obtuvo una resistencia teórica de 79 Ω .

Con base en la experimentación realizada y consultando diversas referencias como [8], [11], [12], se observa que en las expresiones utilizadas para calcular teóricamente el valor de la resistencia de puesta a tierra se expresa ésta como una función de la resistividad del terreno “ ρ ”, la longitud de las varillas “ L ”, la

profundidad de enterramiento de los conductores “s” y el diámetro del anillo “D”, entre otras. La resistividad siempre aparece como un factor que afecta directamente a la resistencia; esto es $R = \rho * f(L, s, D, \dots)$. Con base en esta observación, para un diseño específico la segunda parte de la expresión, señalada anteriormente como $f(L, s, D, \dots)$, se puede tomar como una constante. El valor de esa constante se obtiene a partir del diseño. En consecuencia, conociendo la configuración de la puesta a tierra, sin importar qué tan complicada sea, la resistencia en cualquier punto se puede estimar multiplicando el valor medido de la resistividad del terreno por la constante del diseño “c”. Para el caso de la línea troncal Jaguar, el inverso de la constante del diseño es:

$$k = \frac{1}{c} = \frac{\rho}{R} = \frac{1404}{79} = 17,77 \text{ m}$$

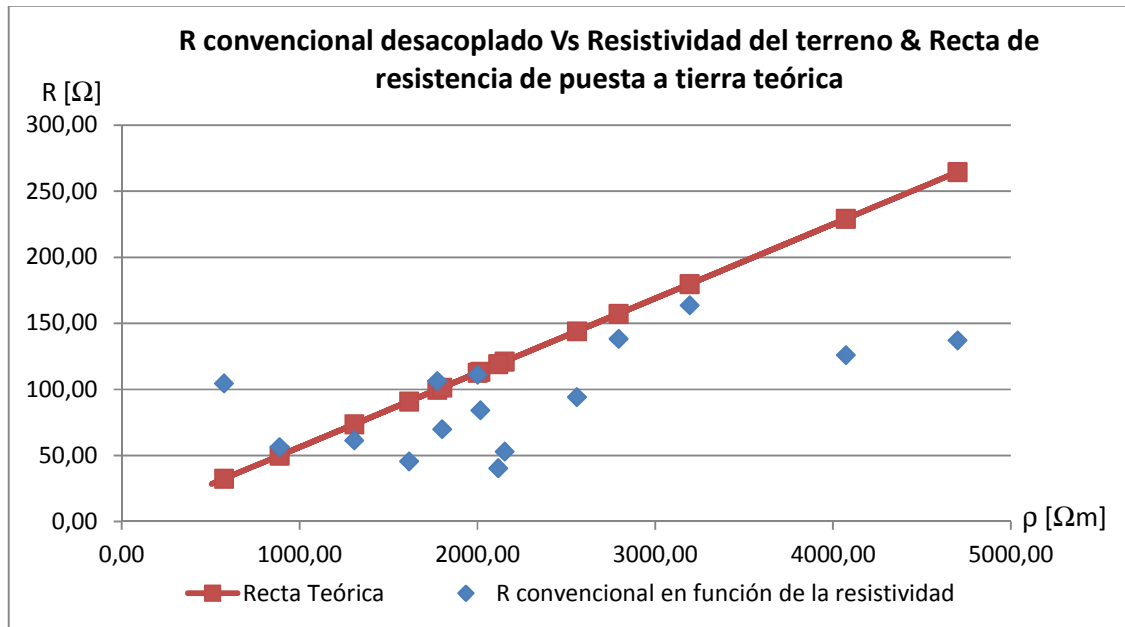
De lo anterior se colige que si la puesta a tierra construida fuese la misma en todas las estructuras, debería mantenerse una relación lineal entre la resistividad del terreno y la resistencia de puesta a tierra medida. Con base en ello, se hizo una regresión lineal, mostrada en la figura 6.

En la Tabla 6 se presentan los valores de resistencia de puesta a tierra calculados a partir de la constante “k” de diseño, así como el respectivo porcentaje de error con respecto a la medición 5 para cada estructura de la línea troncal Jaguar.

Tabla 6. Resistencia de puesta a tierra calculada a partir de k de diseño y %ER con respecto a la medición 5

Estructura	ρ Resistividad Ωm	R calculada a partir de k de diseño Ω	%Error (5-Diseño)
J03	3193,11	179,67	9,82%
J05	4071,50	229,09	81,82%
J07	2558,51	143,96	52,83%
J09	2793,50	157,18	13,65%
J11	2152,62	121,12	128,97%
J13	574,28	32,31	69,08%
J15	4699,82	264,45	92,89%
J19	2015,65	113,42	34,70%
J22	2000,57	112,57	1,32%
J24	1773,11	99,77	6,23%
J27	1306,90	73,54	19,77%
J29A	885,93	49,85	11,61%
J31	1800,76	101,32	44,96%
J34	2116,18	119,07	195,47%
J38	1614,78	90,86	99,25%
Fuente	Autores		

Figura 6. R convencional desacoplado Vs resistividad del terreno



Autores

En la figura 6 se observa la diferencia entre la recta teórica hecha a partir del cálculo de la constante k de diseño y la resistencia de puesta a tierra medida utilizando el método convencional, en función de la resistividad del terreno medida en cercanías de las estructuras. Además, en la tabla 6 se puede apreciar que únicamente en seis estructuras se presentaron porcentajes de error por debajo del 20%. Esto implica que en la construcción de las puestas a tierra no se siguió fielmente el diseño y por tanto para esa línea no es confiable utilizar como un método formal de estimación de la resistencia de puesta a tierra la medición de la resistividad y calcular la resistencia a partir de la constante de diseño.

7. ANÁLISIS DE TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO

Teniendo en cuenta que las líneas consideradas en este trabajo presentan resistencias de puesta a tierra relativamente elevadas con respecto a las establecidas en la norma, se llevó a cabo un estudio de las mediciones presentadas por la empresa “Calidad de Energía” para determinar las tensiones de paso y de contacto.

En el artículo 15.5.3 del RETIE [1] se establece que para calcular las tensiones máximas de paso y contacto se supondrá la existencia de proporcionalidad entre éstas y los valores medidos. De esta manera, al escalar los valores medidos hasta alcanzar la corriente máxima de cortocircuito monofásico, se pueden obtener las tensiones máximas de paso y contacto para cada caso de estudio.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron gráficas de los valores de tensiones contra las corrientes medidas y se efectuó una regresión lineal para extrapolar los resultados a la corriente máxima de cortocircuito calculada. Luego del análisis de las mediciones, el cual se presenta en detalle en [Anexo 5.], y para una tensión de contacto admisible de 508 V, una tensión de paso admisible de 1 542 V y una corriente de cortocircuito monofásico de 1 767 A, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 7. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J7

	Tensión de paso a la corriente de falla V	Tensión de contacto a la corriente de falla V
Polaridad 0° (P1)	114,85	174,42
Polaridad 180° (P2)	120,22	178,12
Fuente	Autores	

Tabla 8. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J15

	Tensión de paso a la corriente de falla V	Tensión de contacto a la corriente de falla V
Polaridad 0° (P1)	95,77	41,35
Polaridad 180° (P2)	97,48	34,18
Fuente	Autores	

Tabla 9. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J24

	Tensión de paso a la corriente de falla V	Tensión de contacto a la corriente de falla V
Polaridad 0° (P1)	380,19	675,30
Polaridad 180° (P2)	391,97	676,15
Fuente	Autores	

Tabla 10. Tensiones de paso y de contacto para la estructura J37

	Tensión de paso a la corriente de falla V	Tensión de contacto a la corriente de falla V
Polaridad 0° (P1)	47,52	68,20
Polaridad 180° (P2)	47,94	68,41
Fuente	Autores	

8. ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO

No obstante que el estudio realizado muestra que los resultados que se obtienen con el telurómetro de pinza (Medición 1) son mejores que los presentados utilizando el telurómetro de alta frecuencia (Medición 2), tomando como referencia de comparación el método convencional (Medición 5), se procede a realizar un análisis técnico y financiero para determinar con cuál método se pueden utilizar los recursos disponibles de la mejor manera. De esta forma se tendrá otro criterio que ayudará a escoger el mejor método de medida a aplicar, dependiendo de las condiciones particulares de cada línea.

En la Tabla 11 que se presenta a continuación se registra una serie de pros y contras, desde el punto de vista técnico, para los tres métodos.

Tabla 11. Pros y contras para los tres métodos

Método	Pros	Contras
Convencional	<p>-Es aceptado por el RETIE como un método válido para realizar las mediciones de resistencia de puesta a tierra en líneas con cable de guarda, siempre y cuando éste se desconecte.</p> <p>-Si se realiza la medición correctamente y con un equipo calibrado, el valor obtenido de resistencia de puesta a tierra se considera verdadero.</p>	<p>-Es inseguro ya que al requerirse la desconexión del cable de guarda se pone en riesgo la vida del operario encargado de la tarea.</p> <p>-La desconexión del cable de guarda es una tarea complicada que consume tiempo y recursos.</p> <p>-Es necesaria la inserción de electrodos en el terreno, lo cual implica desgaste físico y búsqueda de sitios adecuados para realizar la tarea.</p> <p>-En caso de requerir realizar</p>

		<p>mediciones de puesta a tierra a una línea activa, se tiene que coordinar una maniobra de desenergización, lo cual puede ocasionar pérdidas económicas y afectar los índices de continuidad del servicio eléctrico.</p> <p>-El valor de resistencia de puesta tierra mostrado en el equipo depende del error humano y otras varias fuentes de error, ya que las distancias a las cuales se insertan los electrodos auxiliares en el terreno dependen de la topología del diseño y además está la dependencia del instrumento de medición, de la distancia y de la profundidad a la cual se insertaron los electrodos [6].</p> <p>-A pesar de contar con un certificado vigente de calibración del equipo, no hay total certeza de la veracidad de la medida obtenida, ya que debido a su uso o mal uso los equipos se desgastan y es</p>
--	--	--

		probable que fuese necesaria una re-calibración antes de lo estipulado.
Telurómetro de alta frecuencia	<p>-Es aceptado por el RETIE como un método válido para realizar las mediciones de resistencia de puesta a tierra en líneas con cable de guarda, sin necesidad de desconectarlo.</p> <p>-Es seguro ya que al no requerirse la desconexión de cable de guarda, no se pone en riesgo la vida de los operarios.</p> <p>-El hecho de no requerir la desconexión del cable de guarda ahorra tiempo y recursos.</p> <p>-Para realizar pruebas o diagnósticos relacionados con las puestas a tierra de una línea activa no se requiere la coordinación de maniobras de des-energización.</p>	<p>-Es necesaria la inserción de electrodos en el terreno, lo cual implica desgaste físico y búsqueda de sitios adecuados para realizar la tarea.</p> <p>-El valor de resistencia de puesta tierra mostrado en el equipo depende del error humano y otras varias fuentes de error, ya que las distancias a las cuales se insertan los electrodos auxiliares en el terreno dependen de la topología del diseño y además está la dependencia del instrumento de medición, de la distancia y de la profundidad a la cual se insertaron los electrodos [6].</p> <p>-A pesar de contar con un certificado vigente de calibración del equipo, no hay total certeza de la veracidad de la medida obtenida, ya que debido a su uso o mal uso los equipos se desgastan y es</p>

		<p>probable que fuese necesaria una re-calibración antes de lo estipulado.</p> <p>-Su precisión depende en gran medida de la impedancia del cable de guarda y de la distancia entre estructuras con puesta a tierra.</p>
<p>Telurómetro de pinza</p>	<p>-Es seguro ya que al no requerirse la desconexión de cable de guarda no se pone en riesgo la vida de los operarios.</p> <p>-El hecho de no requerir la desconexión del cable de guarda ahorra tiempo y recursos.</p> <p>-No requiere la utilización de electrodos auxiliares. Esto reduce el desgaste físico y lo hace ideal para estructuras ubicadas en pendientes, rodeadas de barrancos y lugares selváticos, en donde se presentan grandes dificultades para enterrar electrodos o la medición no se puede hacer de forma perpendicular a la línea.</p> <p>-Para realizar pruebas o diagnósticos relacionados con</p>	<p>-El RETIE no lo contempla para realizar mediciones de resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión.</p> <p>-Su precisión depende del número de estructuras interconectadas y con puesta a tierra. Sin embargo, como se puede apreciar en el análisis numérico, este efecto no es muy elevado.</p> <p>-Se debe tener acceso y espacio para rodear el bajante con la pinza.</p> <p>-El valor de resistencia de puesta a tierra medido con este equipo tiene un porcentaje de error inherente al principio de funcionamiento del mismo (Ver anexo 4.).</p>

	<p>las puestas a tierra de una línea activa no se requiere la coordinación de maniobras de des-energización.</p> <p>-Los factores que inducen error en la medida como medición y cálculo de distancias, ubicación correcta de electrodos, estado de los conductores, resistencia de los mismos y de los electrodos, etc. no son un problema debido al principio de funcionamiento del equipo.</p> <p>-Mediante una prueba sencilla, se puede comprobar la calibración del equipo en cualquier momento, lo que proporciona gran confiabilidad en las medidas (Ver anexo 6).</p>	
Fuente	Autores	

A continuación, en la Tabla 12, se presentarán algunas consideraciones desde el punto de vista financiero y se incluyen los recursos necesarios para llevar a cabo la medición con cada método, además de un estimativo del costo de los mismos.

Tabla 12. Recursos, costos y consideraciones adicionales para la medición con cada método

	Recursos	Valor \$	Total \$	Consideraciones adicionales
Convencional	-Telurómetro convencional.	7 015 000	15 915 000	<p>-Las mediciones pueden hacerse con sólo un operario y un liniero, pero el tiempo de medición aumenta considerablemente, así como el desgaste físico del operario.</p> <p>-Normalmente las empresas cuentan con este tipo de equipos.</p> <p>-Con base en la experiencia adquirida en campo, el tiempo de medición de una puesta a tierra con este método es de cuarenta minutos, trabajando con dos operarios y un liniero.</p>
	-Dos operarios. Pueden ser dos técnicos electricistas.	3 400 000		
	-Un liniero y equipos asociados: Ratchet, Arnés.	2 000 000		
	-Alquiler de vehículo. (Puede ser indispensable dependiendo del largo de la línea y de la topología del terreno)	3 500 000		
Telurometro de alta frecuencia	-Telurómetro de alta frecuencia.	18 000 000	24 900 000	<p>-Las mediciones pueden hacerse con sólo un operario, pero el tiempo de medición aumenta considerablemente, así como el desgaste físico del operario.</p>
	-Dos operarios. Pueden ser dos técnicos	3 400 000		

	electricistas.			-Normalmente las empresas no cuentan con este tipo de equipos. Por tal razón, habría que comprarlo o alquilarlo.
	- Alquiler de vehículo. (Puede ser indispensable dependiendo del largo de la línea y de la topología del terreno)	3 500 000		-Con base en la experiencia adquirida en campo, el tiempo de medición de una puesta a tierra con este método es de treinta minutos, trabajando con dos operarios.
Telurómetro de pinza	-Telurómetro de pinza.	1 964 000	7 164 000	-Normalmente las empresas no cuentan con este tipo de equipos. Por tal razón, habría que comprarlo o alquilarlo. Sin embargo, el valor tanto de compra como de alquiler es menor que el de los demás.
	-Un operario. Puede ser un técnico electricista.	1 700 000		-Con base en la experiencia adquirida en campo, el tiempo de medición de una puesta a tierra con este método es de diez minutos.
	- Alquiler de vehículo. (Puede ser indispensable dependiendo del largo de la línea y de la topología del terreno)	3 500 000		
Fuente Autores				

Se realizó una consulta con varias empresas que prestan servicios de medición de resistencia de puesta a tierra, para determinar en qué precio se encuentra la medición de resistencia de puesta a tierra con los tres equipos en el mercado actual. Con base en la información obtenida se construyó la Tabla 13, mostrada a

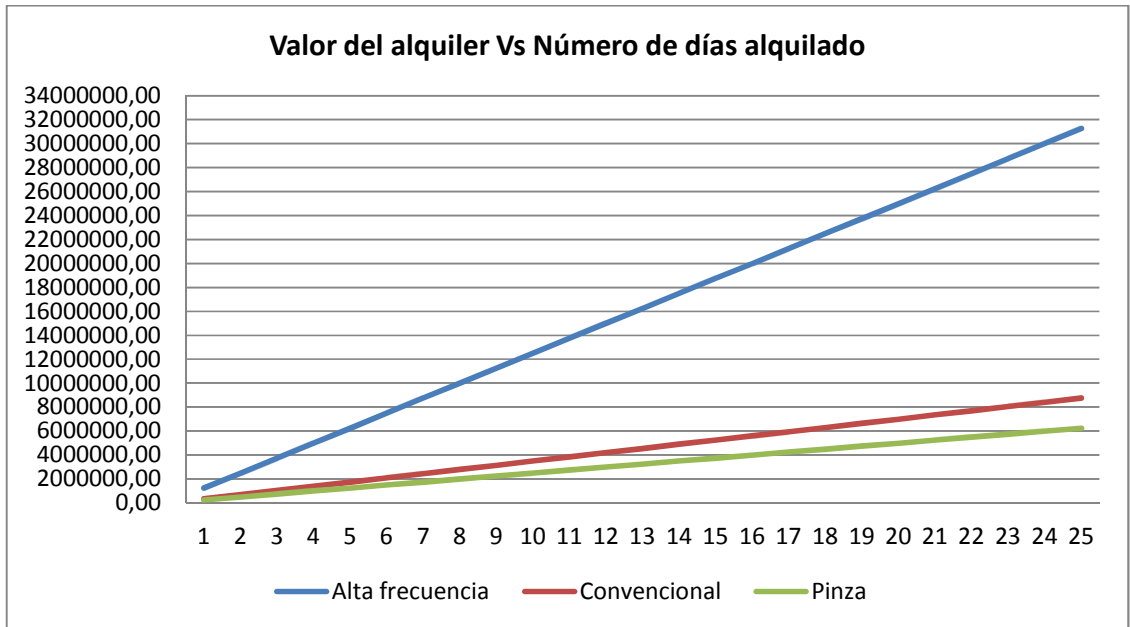
continuación.

Tabla 13. Costos de alquiler, compra y tiempos de medición para cada método

	Valor del equipo \$ millones de pesos	Valor de alquiler/día \$ miles de pesos	Tiempo de medición min	Tiempo necesario para realizar 50 mediciones, considerando un tiempo de desplazamiento entre puestas a tierra de 20 minutos h	Valor de la medición si el equipo fuese alquilado, suponiendo una jornada laboral de 8 h/día \$	Número de puestas a tierra que deberían ser medidas para recuperar la inversión de la compra del equipo	Días de alquiler del telurómetro para recuperar la inversión de la compra del mismo
Alta Frecuencia	18	1 250,00	30	41	6 458 333,3	139	14,40
Convencional	7,015	350,00	40	50	2 172 916,6	161	20,04
Pinza	1,964	250,00	10	25	770 833,3	127	7,86
Fuente	Autores						

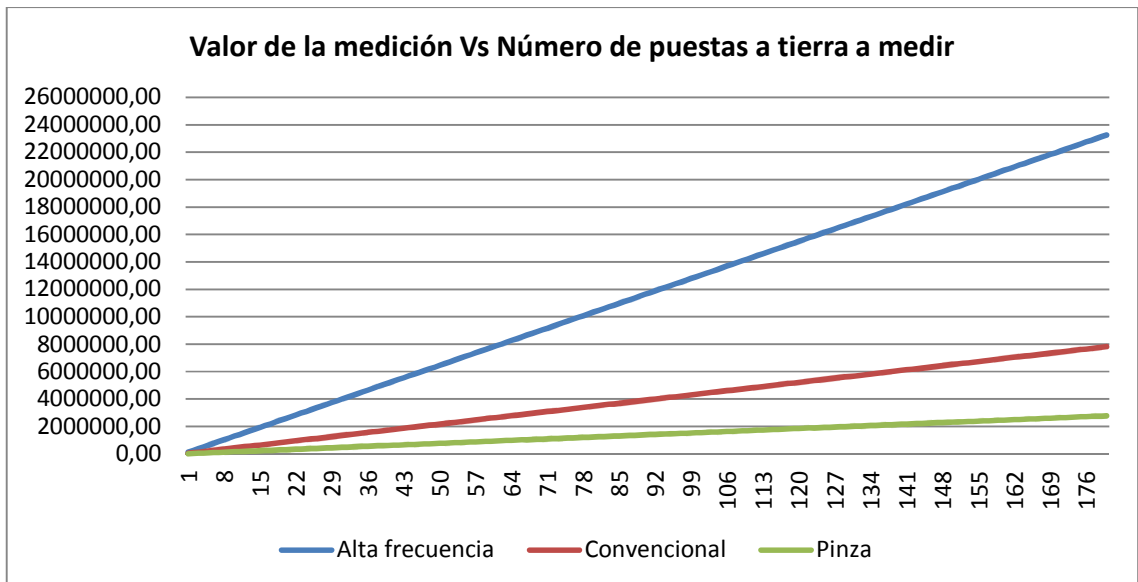
Para tener más elementos de juicio se construyeron dos gráficas adicionales. En la Figura 7 se muestra el valor del alquiler vs el número de días alquilado para cada equipo, mientras que en la Figura 8 se muestra el valor de la medición por puesta a tierra medida para cada equipo.

Figura 7. Valor del alquiler vs el número de días alquilado para cada equipo



Autores.

Figura 8. Valor de la medición por puesta a tierra medida para cada equipo



Autores.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Se comprueba que al realizar la medición por el método convencional, con el equipo de baja frecuencia (según el artículo 15.5.2 del RETIE [1]) pero sin desacoplar el cable de guarda, se obtienen resultados que no son válidos como indicadores de la resistencia individual de la puesta a tierra objeto de medición. En consonancia con las normas vigentes, se concluye que al realizar la medición por el método convencional y el equipo de baja frecuencia, es necesario desacoplar el cable de guarda. Sin embargo, se advierte que cuando un rayo impacta el cable de guarda que está apantallando la línea, la corriente de descarga intentará distribuirse a través de todas las puestas a tierra interconectadas. Por lo tanto, realizar la medición con la bajante acoplada refleja de mejor manera el valor de resistencia que ofrece la línea a la descarga atmosférica.

2. En la Figura 2 se puede observar que la distribución de errores para la medición 3 (convencional con cable de guarda acoplado) con respecto a la medición 5 (convencional con cable de guarda desacoplado) es prácticamente uniforme, con errores que están por encima del 70%. Esto indica que la medición con el equipo convencional y dejando el cable de guarda acoplado es definitivamente inaceptable. Además, la Tabla 3 refleja que los valores de resistencia de puesta a tierra medidos con el cable de guarda acoplado pueden ser similares, como en el caso de la troncal Caracara, o presentar una mayor dispersión, como en el caso de la troncal Jaguar.

3. Al realizar la medición con el equipo de alta frecuencia y el cable de guarda desacoplado (Medición 4), se obtiene un error porcentual promedio del 26,83%, el cual es más bajo que cuando se realiza la medición con el mismo equipo y dejando conectado el cable de guarda (Medición 2), caso para el cual se tiene un error porcentual promedio del 29,6%. Sin embargo, el rango de errores entre los que se encuentra cada caso es muy distinto, ya que para la medición con el cable

de guarda desacoplado se tienen valores que van desde el 1,72% hasta el 86,52%, mientras que para la medición con el cable de guarda acoplado presenta errores entre el 8,64% y el 58,78%. Esto señala la inconveniencia de medir con el equipo de alta frecuencia, desacoplando el cable de guarda. Igualmente se aclara que tratándose del equipo para medición con alta frecuencia, y según el principio de funcionamiento del mismo (Anexo 4.), no tiene sentido realizar las pruebas desacoplando el cable de guarda. Esta comparación sólo se realizó como un ejercicio académico de contrastación de errores.

4. Para verificar que al realizar la medición inyectando una corriente de alta frecuencia efectivamente se aísla el efecto de las demás estructuras, se calculó el error denominado %ER3 (2-4) que se presenta en la Tabla 2. Los resultados indican que en todos los casos el valor obtenido con el cable de guarda acoplado fue menor que el alcanzado con el cable de guarda desacoplado. Esto refleja un efecto de resistencia en paralelo al mantener el cable de guarda acoplado, evidenciando que en los casos medidos la alta frecuencia no logró incrementar suficientemente la impedancia del cable de guarda. Aparentemente estas diferencias se deben a que la distancia entre estructuras no es lo suficientemente grande como para que la reactancia inductiva del cable de guarda simule un circuito abierto. Nota: para la troncal Jaguar se tiene una distancia promedio entre estructuras con puesta a tierra de 240 m y para la troncal Caracara de 250 m.

De otra parte se tiene que el promedio de errores porcentuales %ER3 (2-4) es el 33,64%, lo cual indica que los resultados de las mediciones con el cable de guarda acoplado y sin el cable de guarda acoplado son disimiles. Incluso se encuentra que la distribución de errores es bastante dispersa, siendo 9,24% el límite inferior y 63,99% el límite superior.

5. Para analizar el efecto de la longitud de separación entre las torres con puesta a tierra se elaboró la figura 3, que presenta el valor absoluto del porcentaje de error de las mediciones 2-4, con respecto a la suma de distancias vistas desde cada

estructura hacia la siguiente puesta a tierra. Los resultados muestran una tendencia en la que para mayores distancias la diferencia entre las dos formas de medir va disminuyendo. De hecho, es claro que el menor porcentaje de diferencia (9,24%) se obtuvo con la mayor suma de distancias entre estructuras con puesta a tierra (677,46 m). Esto permite plantear la hipótesis de que para líneas de transmisión con vanos más grandes, por lo tanto distancias entre estructuras con puesta a tierra mayores, el telurómetro de alta frecuencia efectivamente aísla el efecto de las demás estructuras en paralelo. Sin embargo, esto conduciría al equivalente de medir la puesta a tierra con el equipo de alta frecuencia y desconectando el cable de guarda, que de acuerdo con los resultados obtenidos presenta errores dispersos y que pueden ser considerables.

6. Teniendo en cuenta que la Figura 3 muestra qué tan aislada está cada estructura, se analizaron sólo las estructuras donde se aprecie mejor este efecto. Se consideraron las estructuras con un porcentaje de error %ER3 (2-4) menor a 30%. Se observa que de las 7 estructuras que caben dentro de este rango, en 5, resaltadas en verde en la Tabla 1, el valor medido con el telurómetro de alta frecuencia y el cable de guarda acoplado fue mayor al medido con el equipo convencional y el cable de guarda desacoplado. Además, esas 5 estructuras son las únicas en donde se observa este comportamiento. En esas 5 estructuras el error que se presenta en la medida con alta frecuencia y cable de guarda acoplado con respecto a la convencional, varía entre el 10% y el 40%; mientras que el error que se presenta en la medida con alta frecuencia y cable de guarda desacoplado con respecto a la convencional, varía entre el 35% y el 85%.

7. En la columna %ER2 (1-2) de la Tabla 2 se establece una comparación entre la medición con el telurómetro de pinza y el de alta frecuencia, dejando el cable de guarda acoplado. El error porcentual promedio entre estas dos mediciones fue del 27,5% y el rango de errores estuvo entre 1,16% y 85,71%. Lo anterior indica que

es poca la similitud que existe entre los dos métodos de medición.

8. Exceptuando las estructuras J11, J31, C19 y C25, el porcentaje de error que hubo entre la medición con pinzas y la referencia (10,66% en promedio) siempre fue menor al que hubo entre el equipo de medición con corriente de alta frecuencia y la referencia (29,6% en promedio). Para efectos de comparación entre métodos de medición se concluye que es confiable realizar la medición con el telurómetro de pinza y no lo es tanto con el de alta frecuencia. Igualmente, con base en los resultados obtenidos, se concluye que el principio de funcionamiento de la pinza es menos propenso a errores que el del telurómetro de alta frecuencia, ya que para una línea tan corta como la troncal Jaguar (4 km aproximadamente, 15 estructuras con puesta a tierra) el máximo error que hubo con la pinza fue del 23,51% y el mínimo del 0,9%, lo cual indica una buena aproximación.

Por otro lado, con el telurómetro de alta frecuencia el máximo error fue 58,78% y el mínimo 8,64%. Lo que indica que incluso con un pequeño número de estructuras en paralelo, el telurómetro de pinza obtiene resultados aceptables. Por el contrario, cuando se tienen vanos cortos, el telurómetro de alta frecuencia no ofrece resultados confiables y por lo tanto no se aconseja su utilización en este tipo de líneas.

9. De los resultados obtenidos a partir del modelo eléctrico de la troncal Jaguar, tabla 4, se resalta el bajo porcentaje de error que conlleva realizar las medidas con el telurómetro de Pinza. Esto se debe en parte al hecho de tener subestaciones a cada extremo de la línea y que cuentan con sistemas de puesta a tierra bastante exigentes y por lo tanto presentan valores bajos de resistencia de puesta a tierra, como sucede con la subestación Altillanura y el Centro de distribución Jaguar.

Sin embargo, no sucede lo mismo con los resultados de las medidas tomadas en campo, al comparar el método convencional y el telurómetro de pinza. El trabajo realizado evidenció errores un poco mayores a los presentados en la tabla 4. Dicha diferencia de error se debe principalmente al método de medición con el

que se realizaron las medidas de forma convencional: el método de la caída de potencial. Con dicho método se asume que la resistencia real de puesta a tierra se presenta cuando el electrodo de potencial se ubica al 61,8% de la distancia a la cual se ubicó el electrodo de inyección de corriente, lo cual es una aproximación que se convierte en una de las principales fuentes de incertidumbre para la medida.

Otro tipo de fuentes de incertidumbre asociados al método convencional, son los posibles errores humanos al medir la distancia de ubicación de electrodos o incluso la profundidad a la cual se instalan. Todos estos factores que limitan la exactitud de aquellos métodos en los cuales se hincan jabalinas y se aplican metodologías que fueron propuestas mediante aproximaciones, conllevan a plantear la hipótesis que el telurómetro de pinza es el mejor instrumento para realizar medidas de puesta a tierra en líneas de transmisión de energía eléctrica, ya que aplica un principio eléctrico directo para realizar la medida.

10. En la Tabla 14 del Anexo se presentan los valores de resistencia de puesta a tierra de las estructuras que se están analizando en este informe, tomados en días distintos y en consecuencia con condiciones climáticas diferentes. En esa tabla se puede apreciar que en la mayoría de las estructuras hubo cambios en el valor de la resistencia. En promedio, el cambio fue del 16,65%, siendo el 43,35% el valor más alto y 0,72% el más bajo. Estos cambios se deben a que el valor de resistencia de puesta a tierra depende directa y significativamente de la resistividad del terreno. Las mediciones de la columna 4 se hicieron en días en los cuales se presentaba lluvia día por medio o llovía medio día, mientras que las mediciones de la columna 7 se hicieron en días de extrema sequía, donde no llovió ni un solo día en al menos un periodo de una semana.

11. Con el propósito de profundizar en la evaluación de la validez de utilizar el telurómetro de pinza, y teniendo en cuenta la diferencia que puede llegar a presentarse entre dos medidas tomadas a una misma estructura en días

diferentes, producto del cambio en las condiciones climáticas, tal como se presenta en la tabla 14, se comparó el promedio de los errores presentados en esa tabla con el promedio del error %ER1 (1-5). Este último corresponde al porcentaje de error calculado entre los valores registrados con la pinza y el método recomendado por el RETIE (medición convencional con el cable de guarda desacoplado). Se observó que el promedio del error %ER1 (1-5) es menor, por lo que se deduce que la medición de la resistencia de puesta a tierra utilizando el telurómetro de pinza y dejando el cable de guarda conectado es perfectamente válido.

12. Como se puede observar en la figura 8 de la sección Anexos, algunas de las puestas a tierra construidas no siguieron fielmente el diseño (ver FIG. 1). Esto se ve reflejado en la figura 6, en donde a pesar de tener puntos que coinciden con los correspondientes a la recta teórica, una gran cantidad se encuentra por fuera de la misma. Este efecto se presenta especialmente debido a la complejidad del diseño, ya que al requerir dos círculos concéntricos la construcción se complica considerablemente. En ese orden de ideas, se puede suponer que para diseños más simples, como por ejemplo una barra de cobre enterrada, se tendría un comportamiento lineal.

13. En relación con las tensiones de paso y de contacto, el estudio realizado señala que con excepción de la estructura J24, para todas las estructuras se obtienen valores permisibles, verificando de esta manera que las instalaciones son seguras. Para la estructura J24 se presentaron valores atípicos que señalan la existencia de errores en la toma de datos, como lo advierten las observaciones realizadas en el registro digital de datos por parte de la empresa “Calidad de Energía”.

10. CONCLUSIONES

1. Al realizar las mediciones con el telurómetro de pinza se obtuvieron resultados totalmente válidos, que muestran con aceptable exactitud el valor individual de la resistencia de puesta a tierra en la estructura donde se realizó la medición, tomando como referencia el método aceptado por el RETIE. De esta manera se podría obviar la necesidad de desacoplar el cable de guarda e invertir tiempo considerable y recursos en la caracterización de las puestas a tierra de una línea de transmisión; incluso en líneas tan cortas como la línea troncal Jaguar, que tiene aproximadamente 4 km de longitud.

2. Normalmente los telurómetros trabajan a frecuencias diferentes a 60 Hz [3], [4], [5] y por tal razón se descarta la incidencia de corrientes circundantes en el terreno, ajenas a las inyectadas por el equipo o falsedad en la medición por existencia de inducción. Esto implica que para efectos de medición es indistinta la tensión de operación de la línea o si está energizada o desenergizada. Sin embargo, una conclusión definitiva requiere de un estudio detallado en el que se consideren diferentes tipos de líneas.

3. La intención de utilizar corrientes de alta frecuencia se propone en principio con el único objetivo de desacoplar completamente la puesta a tierra bajo medida, del resto del sistema. Sin embargo, los resultados obtenidos cuando se utiliza el telurómetro de alta frecuencia y con el cable de guarda desacoplado, indican que aun cuando se logre un desacople del 100% el resultado no coincide con el valor obtenido de forma convencional. Esto evidencia que el uso de señales de alta frecuencia influye en el comportamiento del suelo, afectando la resistividad del mismo, y además contribuye al aumento del efecto piel en los conductores que hacen parte de la geometría misma de la puesta a tierra. Dicha dependencia de la frecuencia ha sido justificada a partir de estudios detallados de las propiedades eléctricas del suelo, realizados a muestras de diferentes tipos de suelos con

frecuencias que van desde los 50 Hz hasta 200 MHz [11].

4. Aunque este trabajo señala que las medidas tomadas con un telurómetro de alta frecuencia difieren significativamente de las que se tendrían de forma tradicional (ER4-5), no se propone descartar por completo su utilización, ya que los valores de puesta a tierra obtenidos a partir del mismo pueden llegar a representar de forma acertada la capacidad del sistema en medida para conducir a tierra las descargas atmosféricas, las cuales presentan formas de onda de alta frecuencia similares a la del equipo referido. Dichas formas de onda pueden inducir comportamientos del suelo que resultan en resistencias de puesta a tierra con una característica de histéresis [12]. En síntesis, es recomendable establecer y tener en cuenta la frecuencia a la cual se realizan las mediciones, con el fin de caracterizar la respuesta del sistema de puesta a tierra ante los diferentes tipos de descarga.

5. Posibles argumentos en contra de utilizar telurómetros de pinza son la dependencia del número de estructuras en paralelo que estén conectadas a una estructura en medida, o el tamaño de la pinza requerida para realizar medidas en torres metálicas. Estos argumentos son objetables, ya que, por ejemplo, en el caso del presente estudio se tiene una línea corta, de 4 km, con 15 estructuras aterrizadas y aun así se presentan resultados satisfactorios, cuando se comparan con el método aceptado por el RETIE. Además, el hecho de tener generalmente subestaciones en cada extremo de una Línea favorece la medición, ya que éstas cuentan con mallas cuyos valores de puesta a tierra son bajos y hacen que la resistencia equivalente que aporta error a la medida de la pinza pueda ser despreciable. En cuanto al tamaño de la Pinza, existen en el mercado pinzas de diversos tamaños que pueden instalarse en la pata de una torre metálica.

6. Si se pretende que mediante la resistividad del terreno se pueda obtener un análisis teórico válido, es necesario que al construir las puestas a tierra se siga

fielmente el diseño y que a lo largo de la línea éste se mantenga. De esa forma habrá una relación lineal entre la resistencia de puesta a tierra y la resistividad del terreno, que permitirá, mediante la metodología descrita en la exposición de resultados, obtener valores teóricos efectivos de la resistencia de puesta a tierra. Desde el punto de vista financiero, esta metodología implica costos similares a los de realizar la medición convencional, salvo los asociados al desacople del cable de guarda. Desde el punto de vista técnico, a pesar que no se requiere el uso de equipos especializados, ni desconexión del cable de guarda, la metodología no está contemplada en el RETIE y su exactitud depende en gran medida de qué tan fielmente se haya seguido el diseño durante la construcción.

7. Dependiendo de la razón por la cual se compra el equipo, desde el punto de vista financiero se obtuvieron dos resultados: si el equipo se adquiere para ser alquilado, es preferible comprar el telurómetro de alta frecuencia, ya que la inversión se recupera en el día número quince de alquiler y a partir de ese punto las ganancias ascienden rápidamente. Cabe aclarar que la inversión del telurómetro de pinza se recupera en el octavo día de alquiler, pero las ganancias son reducidas. Por otra parte, si el equipo se compra para uso propio, lo indicado es adquirir el telurómetro de pinza. La razón es que la inversión es baja, los recursos necesarios para realizar cada medición son pocos y la inversión se recupera más rápidamente que con los otros equipos. Simbólicamente la inversión se recuperaría en la medición número ciento veintisiete.

11. OBSERVACIONES

1. Para todas las mediciones tomadas en campo se llenaron formatos, uno diseñado por los autores, firmados por el que lo elaboró, el interventor y un ente certificador del RETIE, los cuales se pueden encontrar en el anexo 7. Asimismo, se dispone de un registro fotográfico completo, en el cual se encuentran todas las mediciones en el momento en que el equipo las mostró y diversas situaciones cotidianas de la medición en campo [Ver Anexo 8].

2. Debido a los resultados obtenidos, tanto en lo técnico como en lo financiero, con el telurómetro de pinza, en adición a que éste no está contemplado en el RETIE como un método de medida válido y a que se tiene conocimiento de que hay una actualización del RETIE que está por ser publicada, se hicieron las diligencias respectivas para incluir este método en la norma. Esta tarea se llevó a cabo por medio de un artículo que se preparó para dicho fin. En este momento el proceso sigue avanzando y se espera que este trabajo tenga un aporte en la nueva versión del RETIE o que motive la realización de estudios complementarios, como se indica en la siguiente observación.

3. Dado que a través de este proyecto se pudo ver el gran campo de acción que tienen estos temas en la industria. Se sugiere a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones incentivar trabajos de grado en los siguientes temas:

- Verificación de los resultados obtenidos mediante este trabajo de grado, en líneas de transmisión con características distintas a las de este estudio. Como por ejemplo: líneas con distancias mayores entre estructuras con puesta a tierra, para observar cómo se comporta el telurómetro de alta frecuencia. Líneas con diseños de puesta a tierra sencillos para estudiar la metodología propuesta en la sección 7 de este documento.
- Medición de tensiones de paso y de contacto en líneas con resistencia de puesta

a tierra elevada, mediante diversos métodos. Ej.: método de la inversión de polaridad, inyección de corriente al 1% de la corriente de falla monofásica, inyección de corrientes elevadas.

-Análisis de flameo inverso en líneas con resistencia de puesta a tierra elevada.

-Modelado y simulación de tensiones de paso y de contacto.

-Modelado y simulación de flameo inverso.

REFERENCIAS

- [1] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Agosto 6 de 2008.
- [2] TM-25m Especificaciones Técnicas.pdf
- [3] Telurómetro de pinza Extech 382357 Datos de producto.pdf
- [4] Fluke 1625 Especificaciones Técnicas.pdf
- [5] IEEE 81 – 1983. Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system.
- [6] Memoria de Cálculo de Puestas a Tierra para la Línea de 34,5 kV desde la Subestación Atillanura Hasta Jaguar y Caracara sur.
- [7] Estudio de resistividad eléctrica del terreno, Norman Clavijo, Ingeniería strycon S.A.S, Diciembre 18 de 2010.
- [8] IEEE 142 – 1991. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and commercial power systems.
- [9] Electrical Measurements on Soil With Alternating Currents, By R. L. SMITH-ROSE, D.SC, Ph.D., Associate Member.
- [10] Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents, By S.Sekioka, H.Hayashida, T. Hara, A. Ametani.
- [11] Fundamentos e Ingeniería de las Puestas a Tierra. Respuestas ante fallas eléctricas y rayos. Germán Moreno, Jaime Valencia, Carlos Cárdenas y Walter Villa. Editorial Universidad de Antioquia
- [12] Sistemas de Puesta a Tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF. José Samuel Ramírez y Eduardo Antonio Cano. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- [13] <http://www.disfrutalasmaticas.com/datos/porcentaje-diferencia-error.html>
- [14] Liwie Li, Jiyan Zou, Hui Sun, Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Research on the new clamp-on ground resistance on-line tester based on AC variable frequency, 2006.

ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS DE CAMBIO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA CON EL TIEMPO

En la Tabla 14 se puede apreciar el cambio en el tiempo que presentan los valores de resistencia de puesta a tierra medidos con el método convencional y el cable de guarda desacoplado.

Tabla 14 Porcentajes de cambio de la R con el tiempo.

Estructura	Fecha	Terreno	R convencional desacoplado Ω	Fecha	Terreno	R convencional desacoplado Ω	%ER2
J03	21-sep	S	147,1	12-oct	S	163,60	10,62%
J05	21-sep	S	125,1	12-oct	S	126,00	0,72%
J07	22-sep	S	70,6	12-oct	S	94,20	28,64%
J09	22-sep	S	114,9	12-oct	S	138,30	18,48%
J11	22-sep	S	47,6	12-oct	S	52,90	10,55%
J13	22-sep	S	80,2	12-oct	S	104,50	26,31%
J15	22-sep	Sh	107,9	12-oct	S	137,10	23,84%
J19	22-sep	Sh	54,2	12-oct	S	84,20	43,35%
J22	23-sep	Sh	80,3	12-oct	S	111,10	32,18%
J24	23-sep	Sh	80,4	12-oct	S	106,40	27,84%

J27	23-sep	Sh	59,3	12-oct	h	61,40	3,48%
J29A	23-sep	S	57,7	12-oct	S	56,40	2,28%
J31	23-sep	S	56,6	12-oct	S	69,90	21,03%
J34	23-sep	S	35,7	13-oct	S	40,30	12,11%
J38	23-sep	S	45,1	13-oct	S	45,60	1,10%
C11	24-sep	S	141,7	13-oct	S	189,40	28,81%
C19	24-sep	S	164,6	13-oct	S	157,10	4,66%
C25	24-sep	S	148,3	13-oct	S	153,90	3,71%
“S” para Seco y “Sh” para Semi húmedo						PROM	16,6%
Fuente	Autores						

ANEXO 2. MUESTRA TÍPICA DE PUESTA A TIERRA CONSTRUIDA.

En la figura 9 se presenta una muestra de la típica puesta a tierra construida para las líneas en cuestión y en la figura 10 se presenta la distribución Gaussiana del error obtenido al comparar los valores medidos con el telurómetro de pinza y los hallados utilizando el método convencional. Se destaca que la desviación estándar de los errores de la figura 10 es del 6,69%. Observando la figura 10, se puede apreciar la forma de campana de Gauss. Hecho que refleja que los datos son suficientes para obtener conclusiones.

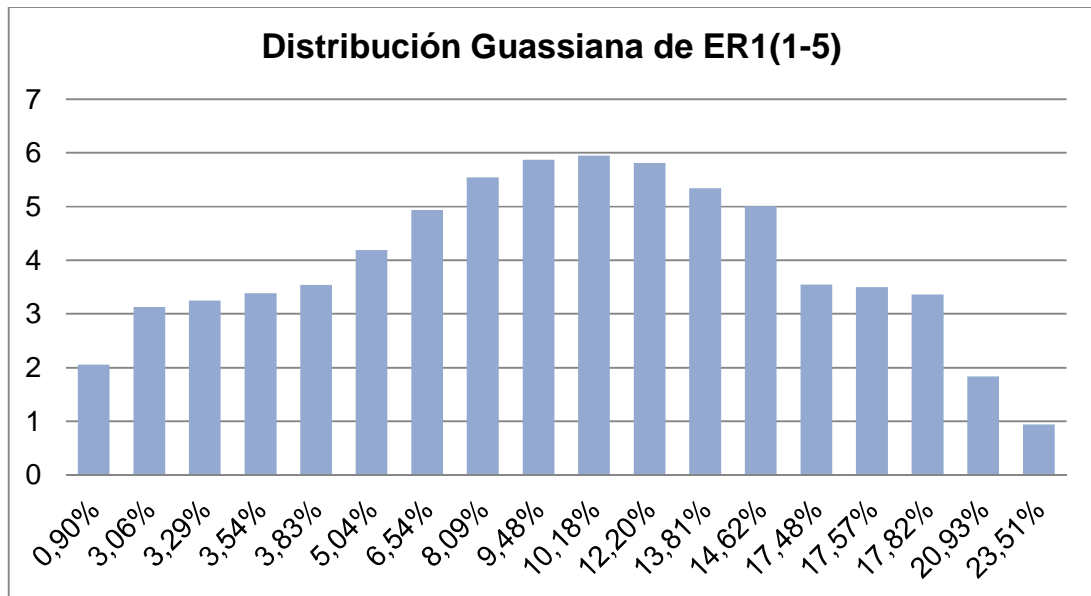
Figura 9. Muestra típica de la puesta a tierra construida.



Foto tomada por los autores.

ANEXO 3. DISTRIBUCIÓN GAUSSIANA DE ER1(1-5)

Figura 10. Distribución Gaussiana de ER1 (1-5)



Autores.

ANEXO 4. INFORME MEDICIÓN CONVENCIONAL Y NO CONVENCIONAL REALIZADO POR AUTORES COMO DOCUMENTO INTERNO DE TRABAJO.

ANEXO 5. INFORME DE MEDICIÓN DE TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO.

ANEXO 6. MANUAL PARA LA MEDICIÓN INDIVIDUAL DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ACOPLADAS POR EL CABLE DE GUARDA.

ANEXO 7. FORMATOS DE REGISTRO DE MEDICIONES

ANEXO 8. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MEDICIONES REALIZADAS EN CAMPO

Nota: Los Anexos que no se encuentran en el presente documento, podrán ser consultados en el CD entregado por los autores a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E³T.