



**MODELAMIENTO Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A 110 KV**

JUAN PABLO PÉREZ LÓPEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2016**



**MODELAMIENTO Y ESTANDARIZACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A 110 KV**

JUAN PABLO PÉREZ LÓPEZ

**Trabajo de grado para optar el título de Especialista en sistemas de transmisión y
distribución de energía eléctrica**

**Director
DIEGO MAURICIO TAUTA RÚA
Msc. en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2016**

Nota de Aceptación

Firma

Nombre:

Presidente del Jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Firma

Nombre:

Jurado

Medellín, 15 de mayo de 2015

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS	10
3. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	11
4. GLOSARIO	20
5. SIGLAS.....	21
6. UNIDADES Y SÍMBOLOS.....	21
7. PROCEDIMIENTO.....	22
7.3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE CADA UNA DE LAS TORRES	68
7.3.2 MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN CADA UNO DE LOS SITIOS DE TORRE	72
7.3.3 MEDIDA EN CAMPO DE LAS TENSIONES DE CONTACTO Y PASO.....	75
7.4.1 ANÁLISIS TORRE No. 1 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II.....	82
7.4.2 ANÁLISIS TORRE No. 23 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II.....	86
7.4.3 ANÁLISIS TORRE No. 74 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II.....	90
7.4.4 ANÁLISIS TORRE No. 123 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II....	96
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
9. BIBLIOGRAFÍA	103

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama Diseño y cálculo de un SPT	12
Figura 2. Efecto de la salinidad, Humedad y temperatura en la resistividad del suelo [5]. 14	
Figura 3. Método de las 4 picas de Wenner [6].....	15
Figura 4. Relación Ks vs resistividad del terreno [7].....	17
Figura 5. Torre tipo celosía autoportada configuración circuito sencillo	23
Figura 6. Patas torre autoportada configuración circuito sencillo	24
Figura 7. Diagrama en ATP línea Rio Grande-Yarumal II	24
Figura 8. Parámetros eléctricos subestaciones Rio Grande y Yarumal II	25
Figura 9. Parámetros cable acero galvanizado 3/8"	25
Figura 10. Parámetros cable 7 No. 8 AWG	28
Figura 11. Parámetros cable ACSR MINORCA HS	30
Figura 12. Cable OPGW.....	32
Figura 13. Parámetros cable OPGW	32
Figura 14. Parámetros eléctricos subestación Barbosa.....	37
Figura 15. Malla de puesta a tierra estándar objeto de análisis.	45
Figura 16. Esquema sistema de puesta a tierra.....	45
Figura 17. Malla de puesta a tierra estándar objeto de análisis (sin escala).	46
Figura 18. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 3/8"	48
Figura 19. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 7/16"	49
Figura 20. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 1/2"	49
Figura 21. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 3/4"	50
Figura 22. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 0.25m.....	52
Figura 23. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 0.50m.....	52
Figura 24. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 0.75m.....	53
Figura 25. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 1.0m.....	53
Figura 26. Malla de puesta a tierra con contrapesos	54
Figura 27. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X15m.....	55
Figura 28. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X25m.....	56
Figura 29. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X35m.....	56
Figura 30. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X45m.....	57
Figura 31. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X45m.....	57
Figura 32. Malla de tierra con contrapesos mixtos	58
Figura 33. Perfiles comparativos Vt y Vp contrapesos de 25m.....	60
Figura 34. Perfiles comparativos Vt y Vp contrapesos de 45m.....	61
Figura 35. Perfiles Vt y Vp contrapesos 15m.....	61

Figura 36. Perfiles Vt y Vp contrapesos 35m.....	62
Figura 37. Perfiles Vt y Vp contrapesos 55m.....	62
Figura 38. Instalación jabalina de puesta a tierra	69
Figura 39. Instalación anillo de control de tensiones en cada pata	69
Figura 40. Instalación y compactación del anillo de control exterior	70
Figura 41. Instalación de contrapesos.....	71
Figura 42. Método de la caída de potencial para medir la RPT	72
Figura 43. Ubicación del electrodo de potencial y de corriente	73
Figura 44. Ubicación del electrodo de tierra.....	73
Figura 45. Disposición equipo de medida.....	74
Figura 46. Resultados obtenidos	75
Figura 47. Equipo MI 3295.....	76
Figura 48. Montaje medida de la tensión de paso	76
Figura 49. Montaje medida de la tensión de toque	77
Figura 50. Medición tensión de paso y contacto.....	78
Figura 51. Posición para medida de la tensión de toque	78
Figura 52. Medida tensión de paso	79
Figura 53. Tierras remotas utilizadas para las pruebas	80
Figura 54. Resultados medida de tensiones y corrientes.....	81
Figura 55. Malla de puesta tierra estándar	82
Figura 56. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Diseño.....	83
Figura 57. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Real.....	84
Figura 58. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Diseño.....	87
Figura 59. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-23.....	88
Figura 60. Perfil de tensiones RY-23 RPT_ Real.....	88
Figura 61. Malla de tierra torre No. 74.....	91
Figura 62. Perfil de tensiones RY-74 RPT_ Diseño.....	92
Figura 63. Perfil de tensiones RY-74 RPT_ Real.....	94
Figura 64. Perfil de tensiones RY-123 RPT_ Diseño.....	97
Figura 65. Perfil de tensiones RY-74 RPT_ Real.....	98

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Corrientes de falla RPT_REAL Guarda_3/8"	26
Tabla 2. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_7 No. 8 AWG	28
Tabla 3. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_ACSR Minorca	30
Tabla 4. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_OPGW	33
Tabla 5. Corrientes de falla RPT_20Ω Guarda_3/8"	35
Tabla 6. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_3/8"	37
Tabla 7. Corrientes de falla RPT= REAL Guarda_3/8" L_100km.....	39
Tabla 8. Resultados variación diámetro cable de tierra	47
Tabla 9. Resultados variación profundidad de enterramiento	50
Tabla 10. Resultados variación longitud de los contrapesos	55
Tabla 11. Resultados variación longitud y forma de los contrapesos.....	59
Tabla 12. Comparativo resultados RPT, Vt y Vp_Caso C y D	63
Tabla 13. Parámetros eléctricos torre No. 1	83
Tabla 14. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-01	84
Tabla 15. Resultados de campo torre No. 01	85
Tabla 16. Resultados obtenidos para los 3 casos de estudio	85
Tabla 17. Medidas Vt y Vp variación capa suelo	86
Tabla 18. Parámetros eléctricos torre No. 23	87
Tabla 19. Resultados de campo torre No. 23	89
Tabla 20. Resultados obtenidos para los 3 casos de estudio	89
Tabla 21. Medidas Vt y Vp variación capa suelo	90
Tabla 22. Parámetros eléctricos torre No. 74	92
Tabla 23. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-74.....	93
Tabla 24. Resultados de campo torre No.74	94
Tabla 25. Resultados obtenidos para los 3 casos de estudio	95
Tabla 26. Medidas Vt y Vp variación capa suelo	95
Tabla 27. Parámetros eléctricos torre No. 123	96
Tabla 28. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-123.....	97
Tabla 29. Resultados de campo torre No. 123	98
Tabla 30. Valores obtenidos para los 3 casos de estudio.....	99

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Corrientes de falla Rio Grande–Yarumal II RPT_Real Guarda_3/8”	26
Gráfica 2. Corrientes de falla por las torres (Guarda_3/8”)	27
Gráfica 3. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_7 No. 8 AWG	29
Gráfica 4. Corrientes de falla por las torres Guarda_7 No. 8 AWG	29
Gráfica 5. Corrientes de falla_ RPT_Real Guarda_ACSR MINORCA	31
Gráfica 6. Corrientes de falla por las torres_Guarda ACSR Minorca	31
Gráfica 7. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_OPGW	33
Gráfica 8. Corrientes de falla por las torres_Guarda OPGW	34
Gráfica 9. Corrientes de falla RPT_20Ω Guarda_3/8”	35
Gráfica 10. Corrientes de falla por las torres Guarda_3/8” RPT_20Ω	36
Gráfica 11. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_3/8”	38
Gráfica 12. Corrientes de falla por las torres. Guarda_3/8” RPT_REAL	38
Gráfica 13. Corrientes de falla RPT_REAL Guarda_3/8” L_100km	40
Gráfica 14. Corrientes de falla por las torres. Guarda_3/8” RPT_REAL L_100km	40

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de grado es una aplicación que tiene como objetivo analizar la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en el diseño del sistema de puesta a tierra de las torres en una línea de transmisión, y proponer así un sistema de puesta a tierra que sea aplicable para las torres en líneas de transmisión con un nivel de voltaje hasta 110/115 kV; el cual garantice el cumplimiento de todas las condiciones técnicas y parámetros de seguridad exigidos por la normatividad técnica nacional, e igualmente sea práctico y sencillo de implementar, especialmente en las condiciones topográficas donde normalmente se emplazan las líneas de transmisión en Colombia.

Las líneas de transmisión a 110 kV que se han construido en los últimos años y que se están construyendo actualmente han presentado problemas en relación con los valores de resistencia de puesta a tierra, lo anterior debido a que cuando se realizan las mediciones en campo se encuentran valores de resistividad del terreno demasiado altos, lo cual no solo afecta el aislamiento de la línea de transmisión frente al flameo inverso por descargas atmosféricas, sino que adicionalmente impacta negativamente las tensiones de toque y de paso, poniendo en peligro a las personas y seres vivos que se encuentran en el área de influencia de la línea.

Normalmente para controlar el valor de la resistencia de puesta a tierra y los altos valores de tensiones de paso y contacto se utilizan materiales para el mejoramiento del suelo (suelos artificiales, bentonita, cementos conductivos, etc.) o materiales superficiales como grava o incluso concreto, sin embargo la aplicación de estos materiales se realiza comúnmente en las subestaciones eléctricas debido a que es un solo lugar y es relativamente económico realizar la implementación; sin embargo, utilizar este tipo de disposiciones en líneas de transmisión resultaría más costoso, ya que se estaría hablando de realizar la misma implementación de la subestación para varias torres (desde un 20% hasta el 80% de la totalidad de las torres), lo cual seguramente haría el proyecto inviable económicamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se proponen otras alternativas que permitan obtener valores de resistencias de puesta a tierra consistentes con la coordinación de aislamiento de la línea, y que a su vez permitan controlar los valores de tensiones de paso y contacto.

2. OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un esquema eficiente del sistema de puesta a tierra, que sea aplicable a las líneas de transmisión a 110 kV. Tal esquema debe garantizar las condiciones técnicas y de seguridad exigidas por la normatividad técnica colombiana.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la influencia del cable de guarda seleccionado para la línea de transmisión en la distribución de las corrientes a través de los sistemas de puesta a tierra de cada una de las torres al momento de una falla.
- Realizar un análisis de sensibilidad que permita identificar el comportamiento de las tensiones de toque y de paso y la resistencia de puesta a tierra al variar las características técnicas del sistema de puesta a tierra; como por ejemplo la variación del diámetro del cable de tierra, la profundidad de enterramiento del cable y el uso de contrapesos de diferente longitud.
- Realizar la comparación entre los valores de la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y de paso obtenidos en la ingeniería con los resultados medidos en sitio.

3. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La finalidad de una instalación de puesta a tierra es desviar directamente a tierra cualquier corriente que se salga de su camino habitual con el objeto de limitar la tensión que puedan alcanzar las masas metálicas con respecto a tierra, asegurar que funcionen las protecciones y evitar en la medida de lo posible averías en los equipos. Estas corrientes pueden ser provocadas por defectos en la red eléctrica o provenir de descargas de origen atmosférico. [1]

Para el caso específico de las líneas de transmisión, el sistema de puesta a tierra es un elemento esencial del sistema de aislamiento eléctrico de la línea, dada la dependencia directa del comportamiento de las sobretensiones por descarga atmosférica (flameo inverso) en las torres con el valor de la resistencia de puesta a tierra de la misma, además, un adecuado sistema de puesta a tierra en las torres permite una distribución segura de las corrientes de falla a tierra controlando así los voltajes peligrosos en los sitios circunvecinos a las torres.

3.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO Y CÁLCULO SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La normativa vigente (RETIE 2013, IEEE-80 2000 IEEE-142 2007) establece los pasos a seguir para el cálculo y diseño de las instalaciones de puesta a tierra, dichos pasos se enumeran a continuación [2].

1. Investigación de las características del suelo.
2. Determinación de corriente máxima de puesta a tierra y tiempo de despeje.
3. Diseño preliminar de puesta a tierra.
4. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra.
5. Cálculo de tensiones de paso en el exterior de la instalación.
6. Cálculo de tensiones aplicadas.
7. Investigar tensiones transferibles al exterior.
8. Ajuste del diseño preliminar.

En la Figura 1 se ilustra el diagrama de flujo para el diseño y cálculo de la malla de puesta a tierra:

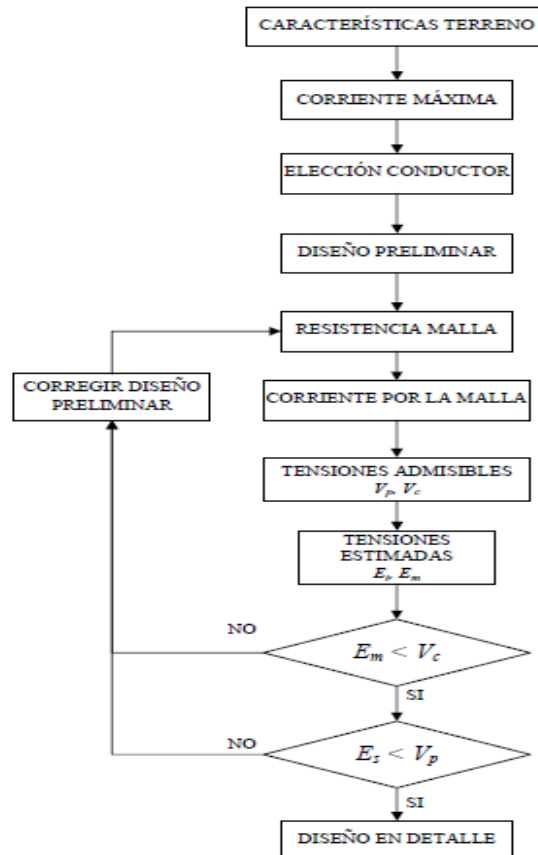


Figura 1. Diagrama Diseño y cálculo de un SPT

3.3 RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo, se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo, su magnitud se expresa en $(\Omega \cdot m)$ o $(\Omega \cdot cm)$ y es inversa a la conductividad [3].

ELEMENTOS INFLUYENTES EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno en un lugar y en un momento determinado está definida por diversos factores que se citan a continuación:

Composición del terreno

La resistividad de un determinado suelo variará en función de los minerales que lo integran, así como la naturaleza de estos. A medida que disminuye el tamaño del grano también lo hace la resistividad y así mismo al aumentar la compactación de las partículas éste se convierte en mejor conductor.

Estratigrafía

Es muy difícil encontrar un terreno totalmente homogéneo. El suelo normalmente está formado por varias capas, las cuales suelen presentar distinta naturaleza y por lo tanto resistividades diferentes. También suelen producirse variaciones laterales en la resistividad, pero estas son, por regla general, mucho menos acentuadas que las verticales.

Es preciso conocer cómo varía la resistividad del terreno según aumenta la profundidad para hacer un diseño adecuado de la malla de tierra.

Las estimaciones basadas en análisis visuales del tipo de suelo sólo nos dan una ligera idea de la resistividad que puede tener, por lo tanto es de imperativa importancia realizar mediciones *in situ*. Hay que realizar diferentes medidas para verificar si la resistividad cambia con la profundidad. Si apreciamos grandes variaciones sería aconsejable realizar un número elevado de mediciones para obtener información más detallada y así evitar futuros problemas en la seguridad de la instalación [4].

Humedad

A mayor humedad disminuye la resistividad del terreno y viceversa. Las zonas cercanas a los ríos, a pozos o al mar son buenos terrenos que ofrecen poca resistencia al paso de la corriente. No obstante, la presencia de agua en la superficie del terreno no significa necesariamente que éste presente una baja resistividad [5].

Temperatura

Al igual que la humedad, un aumento de la temperatura provoca la disminución de la resistividad del terreno. Por otro lado por debajo de 0°C el agua que contiene el suelo se congela, y el hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico. Por esto es importante evaluar muy bien los sitios de torre para definir la profundidad a la que se debe llevar la malla de puesta a tierra [5].

Salinidad

Las sales minerales facilitan la conducción de la corriente. En ocasiones se pueden añadir estas sales para mejorar las condiciones en suelos muy resistivos [5].

Estacionalidad

Es evidente que tanto la temperatura como la humedad e incluso la salinidad del suelo variarán a lo largo del año dependiendo de la estación en la que nos encontremos, factor que debemos tener en cuenta, en previsión de futuros cambios según la fecha en la que realicemos las medidas.

En la Figura 2 se muestran las curvas de comportamiento de la salinidad, la humedad y la temperatura

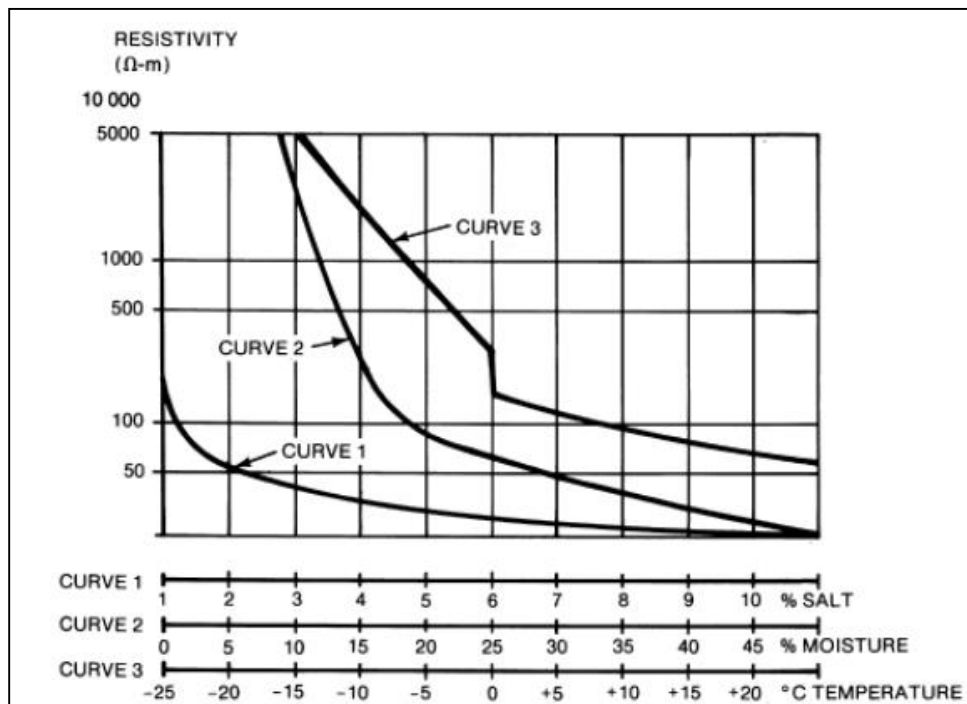


Figura 2. Efecto de la salinidad, Humedad y temperatura en la resistividad del suelo [5]

3.4 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

El valor de la resistividad del terreno juega un papel decisivo en el valor de resistencia de puesta a tierra, las tensiones de paso y contacto que aparecerán en la instalación durante una falla, por lo que tener datos precisos puede ser vital a la hora de dimensionar correctamente. Un estudio geotécnico completo de la zona sería lo ideal, pero en caso de no disponer de los medios se puede obtener valores de resistividad aproximados como se indica a continuación:

Método Wenner

Hay varios métodos para medir la resistividad eléctrica del terreno. El más empleado en la actualidad y el recomendado en Colombia por el RETIE, es el método de las 4 picas de Wenner, que consiste en enterrar cuatro picas de no demasiada longitud, alineadas y equidistantes entre sí, por las picas más alejadas se hace circular una corriente y se mide la tensión entre las dos picas internas. El telurómetro, aparato que se utilizará para la medida, y al que estarán conectadas las cuatro picas de prueba, devuelve como resultado la resistencia que ofrece el terreno al paso de la corriente (U/I). Finalmente, para hallar la resistividad aparente basta con aplicar la siguiente fórmula a partir de los datos obtenidos [6].

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

ρ_a = Es la resistividad aparente del suelo en $\Omega \cdot m$

R= Es la resistencia medida en Ω

a= Es la distancia entre 2 electrodos consecutivos en m

b = Es la longitud de un electrodo en m

En la Figura 3 se ilustra uno de los métodos más utilizados para el cálculo de la resistividad del terreno

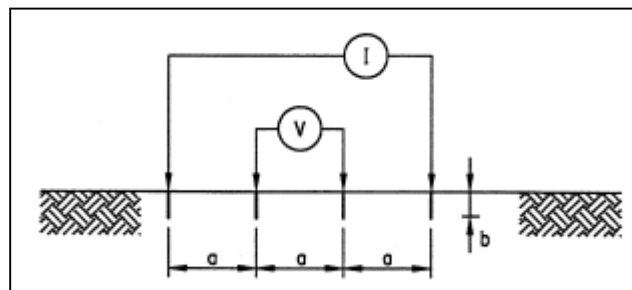


Figura 3. Método de las 4 picas de Wenner [6]

La corriente tiende a circular cerca de la superficie si la separación entre picas es pequeña y cuanto más se separan, la corriente circula más profundamente. Se asume que la resistividad obtenida corresponde a una profundidad equivalente a la separación entre las picas (a). Graficar la resistividad aparente frente a la separación entre las picas nos da una idea general de la distribución de las diferentes capas.

Si hay conductores enterrados en las cercanías, mallas ya existentes por ejemplo, los caminos seguidos por la corriente se pueden ver alterados, por lo que las medidas no serán fiables a no ser que se realicen a grandes profundidades.

Las medidas deben realizarse, cuando sea posible, en un área cuyo radio comprenda entre 3 y 5 veces la diagonal de la malla. Así mismo habrá que respetar una distancia mínima entre los electrodos de prueba (aproximadamente 5 veces la longitud del electrodo mayor) para que no se vean sometidos a influencias mutuas.

MODELACIÓN DEL TERRENO

Las ecuaciones que se emplean normalmente para calcular la resistencia de las mallas de puesta tierra están basadas en hipótesis de terrenos homogéneos. El método Wenner como tantos otros conduce a la obtención de la “resistividad aparente” que se define como aquella correspondiente a un terreno homogéneo, en el cual para una disposición de picas y una corriente inyectada, se produce una elevación del potencial equivalente a la de un terreno no homogéneo.

Interpretar los datos hallados de resistividad aparente es la parte más difícil del proceso. Se trata de encontrar un modelo de terreno que se asemeje al real. Cuando sea posible emplearemos programas diseñados para tal efecto, que a partir de las medidas del método Wenner nos devuelven información bastante aproximada de la disposición de las capas existentes.

Si no disponemos de los medios podemos hacer la aproximación de forma manual. Los modelos más utilizados son el terreno uniforme y el modelo de dos capas. Un terreno uniforme es aquel en el que la variación tanto lateral como vertical de la resistividad del terreno no es muy notable. Cuando el terreno presente claras variaciones en la resistividad se pueden emplear modelos multicapa, que aproximaremos normalmente al modelo de dos capas. [6]

Suposición de suelo uniforme

Este modelo sólo debe ser usado cuando las variaciones de la resistividad aparente (a diferentes profundidades) son moderadas. Este modelo vendría dado por una línea aproximadamente recta en la gráfica de resistividad frente a profundidad. Podemos hallar la resistividad del modelo uniforme equivalente calculando la media aritmética de las resistividades obtenidas.

$$\rho = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad [6]$$

ρ_a = Es la resistividad equivalente en $\Omega.m$

$\rho_{a(i)}$ = son las resistividades aparentes a diferentes profundidades en $\Omega.m$

n = Es el número de medidas realizadas

Modelo de dos capas (Bicapa)

Si a medida que aumenta la profundidad de las medidas se producen resultados de resistividad similares, luego un cambio brusco y luego otra serie de resultados similares, nos encontramos ante un modelo de terreno de dos capas. Podemos realizar un cálculo aproximado de la resistividad de la capa superior e inferior haciendo dos grupos con las

resistividades previas y posteriores al salto y realizando la media aritmética de las resistividades pertenecientes a cada grupo.

Sea ρ_1 la resistividad de la capa superficial y ρ_2 la resistividad de la capa inferior:

- $\rho_1 > \rho_2$ y el grosor de la capa superficial no es muy grande, las corrientes pasaran rápidamente a la capa inferior reduciéndose las tensiones de paso y contacto. La adición de picas a la malla disminuirá la resistencia de puesta a tierra significativamente. A medida que la capa superior es más gruesa, el sistema se comportará como si se tratara de un suelo uniforme de resistividad ρ_1 .
- Si $\rho_1 < \rho_2$ las corrientes fluirán más en superficie, lo que provocará mayor densidad de corriente en el perímetro de la malla y gradientes de tensión que pueden resultar peligrosos [6].

El factor que relaciona el comportamiento de la resistividad del terreno para ambas capas es k (Coeficiente de reflexión), el cual viene dado por la siguiente formula:

$$k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$$

En la formula se observa que al tener un valor de resistividad mayor en la capa inferior del suelo el factor k se aproxima a la unidad, disminuyéndose la diferencia entre el potencial de la torre y el potencial de tierra (GPR)

En la Figura 4 observa como varía el perfil de tensiones a medida que el factor k cambia de acuerdo con las resistividades de cada sitio.

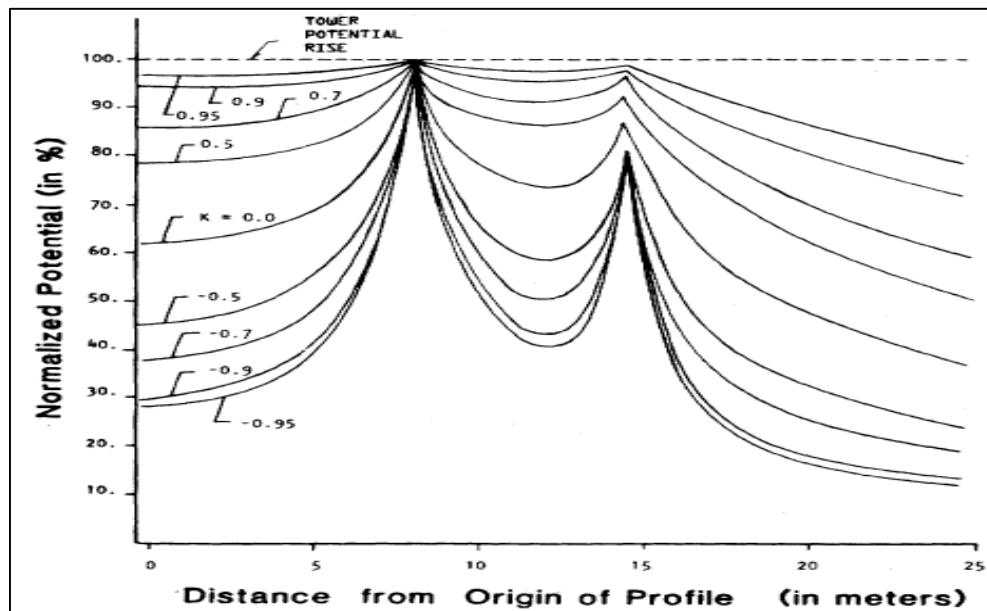


Figura 4. Relación K_s vs resistividad del terreno [7]

De acuerdo con la figura para el caso en que se tenga un factor k de -0.9 se tendrá una diferencia de potencial de aproximadamente el 70% de la tensión real, presentándose la probabilidad de que para este caso se generen afectaciones a los seres vivos que puedan tener contacto con la estructura. Por lo tanto lo ideal es que el factor k se encuentre siempre lo más cercano a la unidad de esta manera la diferencia de potencial será cada vez menor.

3.5 CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La resistencia de puesta a tierra es la oposición al paso de la corriente de un material específico que se utiliza para construir un sistema de puesta a tierra que permitirá conducir eventuales corrientes de falla a tierra impidiendo que puedan afectar a los seres que están en contacto con cualquier tipo de instalación eléctrica.

La resistencia de puesta a tierra se calcula teniendo en cuenta la norma IEEE std 80-2000 [8].

3.6 TENSIONES DE TOQUE Y PASO

Tensión de toque

Corresponde a la diferencia de tensión entre el GPR (Ground Potential Rise) y la tensión en la superficie en el punto en donde una persona se para, mientras al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura puesta a tierra.

$$E_{touch} = IB*(RB + 1.5\rho)$$

IB: Magnitud de la corriente rms que circula por el cuerpo de un ser vivo.

ρ : Resistividad del terreno

RB: Resistencia del cuerpo (valor recomendado 1000 Ω). Dicho valor depende de la masa corporal de cada ser vivo y varía entre 500 y 3000 Ω

$$IB = \frac{K}{\sqrt{ts}} \quad [6]$$

$$k = \sqrt{Sb} \quad [7]$$

Sb: es la constante empírica relacionada con la energía de choque eléctrico tolerado por un porcentaje de una población determinada.

Para una persona de 70 kg se toma un valor para *Sb* de 0.0246 obteniendo un valor de *k*= 0.157

$$IB = \frac{0.157}{\sqrt{ts}} \quad [8]$$

ts: Es el tiempo de exposición a la corriente en segundos, se puede considerar normalmente entre 0,03 y 3 segundos.

Finalmente la formula obtenida para el voltaje de toque es:

$$E_{touch} = (1000 + 1.5Csps)0.116/\sqrt{ts}$$

Siendo *Cs* el factor de reducción de potencia en la capa superficial. La reducción del factor *Cs* es función del factor *k* y el espesor de la capa más alta (*h*).

Tensión de paso

Es la diferencia de tensión en la superficie, experimentada por una persona con los pies separados una distancia de un metro y sin estar en contacto con ningún objeto aterrizado.

$$E_{step} = IB(RB + 6.0\rho)$$

IB: Magnitud de la corriente rms que circula por el cuerpo

ρ : Resistividad del terreno

RB: Resistencia del cuerpo (valor recomendado 1000 Ω)

$$IB = \frac{k}{\sqrt{ts}} \quad [9]$$

$$k = \sqrt{Sb} \quad [10]$$

Sb: es la constante empírica relacionada con la energía de choque eléctrico tolerado por un porcentaje de una población determinada.

Para una persona de 70 kg se toma un valor para *Sb* de 0.0246 obteniendo un valor de *k*= 0.157

$$IB = \frac{0.157}{\sqrt{ts}} \quad [11]$$

ts: Es el tiempo de exposición a la corriente en segundos, se puede considerar normalmente entre 0,03 y 3 segundos.

$$E_{step} = (1000 + 6.0Csps)0.116/\sqrt{ts}$$

Siendo *Cs* el factor de reducción de potencia en la capa superficial. La reducción del factor *Cs* es función del factor *k* y el espesor de la capa más alta (*h*)

4. GLOSARIO

CORRIENTE DE FALLA: Es la corriente que se genera en un sistema al momento de un cortocircuito, el cual se puede dar debido a una descarga atmosférica o una maniobra

CORRIENTE DE PUESTA A TIERRA: Es la corriente total que se deriva a tierra a través de la puesta a tierra. Es la parte de corriente que provoca la elevación del potencial en una instalación de puesta a tierra.

GROUND POTENTIAL RISE: Es el máximo potencial que se encuentra en una malla de puesta a tierra en el momento en que se presenta una descarga a tierra debido a una descarga atmosférica o una maniobra eléctrica. Normalmente el mayor valor de este parámetro se encuentra en el punto de entrada a la malla ya que físicamente es el punto más cercano a la fuente.

HILO O CABLE DE GUARDA (GROUND WIRE): Conductor conectado a tierra en alguno o en todos los apoyos, dispuesto generalmente por encima de los conductores de fase, con el fin de asegurar una adecuada protección frente a las descargas atmosféricas.

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA: Es un elemento que se usa para limitar las corrientes de falla, evitando así que se dañen los equipos asociados al sistema eléctrico, o que las personas que se encuentren en el área de influencia puedan sufrir algún tipo de daño.

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA: Es un conjunto de elementos que se emplea en las instalaciones eléctricas para llevar a tierra cualquier derivación indebida de la corriente eléctrica.

VOLTAJE DE TOQUE: Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo

VOLTAJE DE PASO: Es la diferencia de potencial que podría experimentar una persona entre sus pies con separación de 1 m, cuando se presenta una corriente de falla en una estructura cercana puesta a tierra, pero no se tiene contacto con ella.

RELACIÓN X/R: Es la relación entre la reactancia y la resistencia de un sistema de potencia, en un sistema de transmisión la reactancia es mucho mayor que la resistencia, tanto que en ocasiones se desprecia en los análisis fallas o flujos de carga.

TIEMPO DE FALLA: Es el tiempo que permanece una falla en un sistema de potencia, Normalmente es de milisegundos (ms), ya que si no es despejada rápidamente por los equipos de protección puede causar daños graves en los equipos.

TIERRA (GROUND O EARTH): Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de

agua. El término “masa” solo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos, los carros y otros.

5. SIGLAS

ATP: Alternative Transient Program

GPR: Ground Potential Rise

HV: High Voltage

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

SPT: Sistema de puesta a tierra

6. UNIDADES Y SÍMBOLOS

A: Amperio

kVA: Kilovoltio amperio

kVA_r: Kilovoltio amperio reactivo

kV: Kilovoltio

kW: Kilovatio

R: Resistencia

L: Impedancia

C: Capacitancia

ρ: Resistividad eléctrica del terreno

7. PROCEDIMIENTO

El proyecto de grado está compuesto por 4 etapas:

- I. Implementación del modelado circuital de varias líneas de transmisión a 110 kV en el software libre educacional Alternative Transients Program (ATP) para obtener los parámetros eléctricos del sistema como corrientes y voltajes en estado estable o en estado de falla. Se modelan diferentes casos modificando varios parámetros, especialmente el cable de guarda de la línea de transmisión, con el fin de identificar cuáles de estos tienen mayor dependencia con los niveles de falla.
- II. Los valores obtenidos en la primera etapa, y la información necesaria para el diseño del sistema de puesta a tierra, son utilizados como insumo para modelar en el software CYMGRD una sistema genérico de puesta a tierra, la cual permitirá realizar diferentes análisis de sensibilidad y verificar el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso ante variaciones de parámetros tales como el diámetro del cable de tierra, la profundidad de enterramiento de la malla, la longitud de los contrapesos, la forma de los contrapesos, el material del cable entre otros.
- III. Se analizan casos reales de la línea en el software CYMGRD y se obtendrán los valores de la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso. Después se compara dicha información con los resultados obtenidos en campo.
- IV. Se implementa en campo el sistema de puesta a tierra definido en la etapa anterior y se realizan las pruebas necesarias para verificar la relación existente entre los datos calculados teóricamente y los obtenidos en campo; garantizando así que el sistema de puesta a tierra propuesto cumple con los requerimientos de seguridad estipulados por la normatividad técnica colombiana

7.1 ETAPA 1 MODELO CIRCUITAL EN ATP

Se modelaron algunas líneas de transmisión a 110 kV en el software Alternative Transients Program (ATP) para obtener los parámetros eléctricos del sistema como corrientes y voltajes en estado estable o en estado de falla, evaluando la influencia de diferentes variables en el comportamiento de estos parámetros.

Inicialmente, se modeló la línea de transmisión a 110 kV Rio Grande – Yarumal II la cual tiene las siguientes características técnicas:

- Está ubicada en el norte del departamento de Antioquia, inicia en la subestación Rio Grande en el municipio de Don Matías y finaliza en la subestación Yarumal II en el municipio de Yarumal.
- Tiene una longitud de 52,9 km y cuenta con 119 torres autoportadas en acero galvanizado.
- El conductor de fase es un ACSR 477 kcmil HAWK y el cable de guarda es un cable de acero galvanizado 3/8" HS.
- El cable que se utilizó para el sistema de puesta a tierra es acero galvanizado 7/16" HS
- La línea tiene una configuración vertical de circuito sencillo, en las figuras 4 y 5 se ilustra el tipo de torre que se va a instalar en la línea de transmisión.

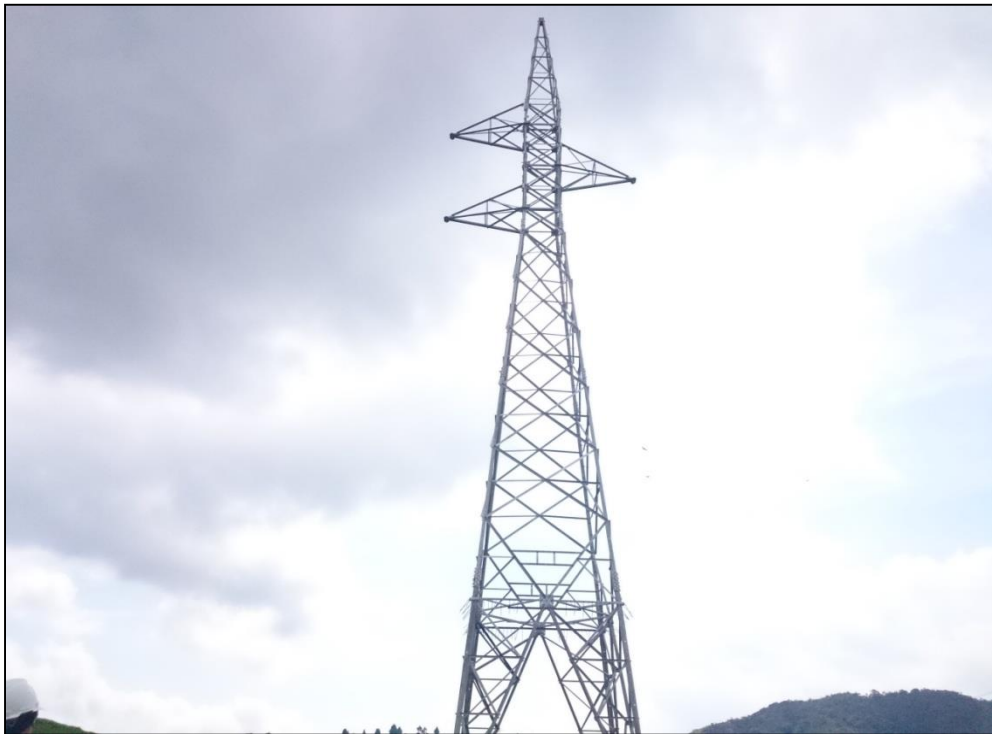


Figura 5. Torre tipo celosía autoportada configuración circuito sencillo



Figura 6. Patas torre autoportada configuración circuito sencillo

En la Figura 7 se muestra el diagrama general en ATP de la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II. Para este caso solo se muestra una fracción modelado.

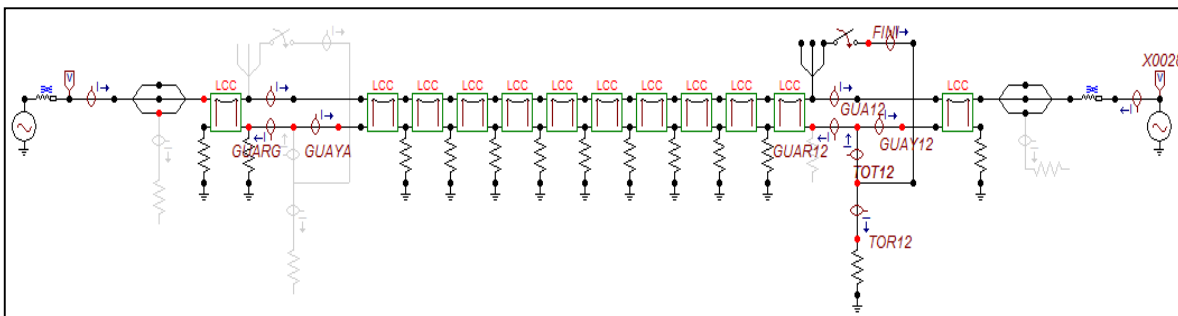


Figura 7. Diagrama en ATP línea Rio Grande-Yarumal II

CASOS DE ESTUDIO

Se modela en ATP diferentes casos de estudio con el fin de verificar el comportamiento de la línea de transmisión ante la variación de diferentes parámetros como la longitud de la línea, la resistencia de puesta a tierra y el tipo de cable de guarda.

Se simularon en ATP las 119 torres que tiene la línea de transmisión con los respectivos valores de resistencia de puesta a tierra obtenidos para cada una de éstas en la modelación dentro de la ingeniería de detalle, la longitud real de los vanos y las características técnicas

de cada uno de los materiales utilizados para la construcción. Adicionalmente se subdividió la línea en 12 tramos cada uno de 4,41 km, con el fin de poder realizar un análisis más general pero sin perder el detalle.

Después se procedió a modelar una falla monofásica en cada uno de los tramos y se verificaron las corrientes de cortocircuito a través del cable de guarda que se dirige a la subestación Yarumal II, el cable de guarda que se dirige a la subestación Rio Grande y a través de la estructura más cercana a la falla.

Los parámetros eléctricos de la línea de transmisión fueron suministrados por Empresas Públicas de Medellín y se relacionan en la Figura 8 que se muestra a continuación:

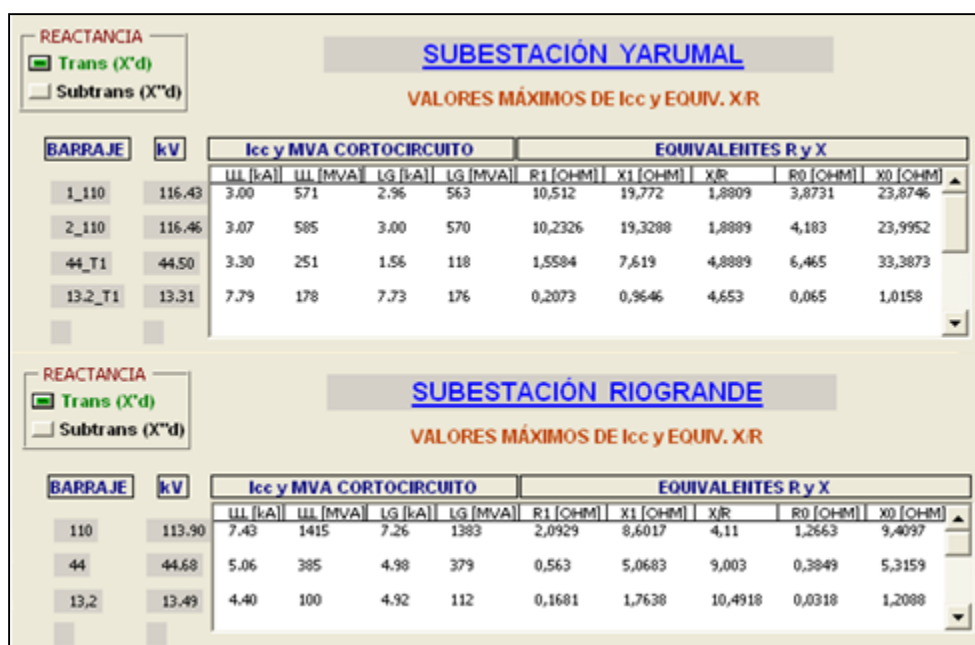


Figura 8. Parámetros eléctricos subestaciones Rio Grande y Yarumal II

Caso A: Variación del cable de guarda de la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II

I. Cable de guarda 3/8"

Para este primer caso se utilizó en la simulación un cable de acero galvanizado 3/8" HS.

En la Figura 9 se muestran los parámetros del cable de acero galvanizado 3/8" HS

#	Ph.no	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	4	0	0.457	4.11	0	38.7	17

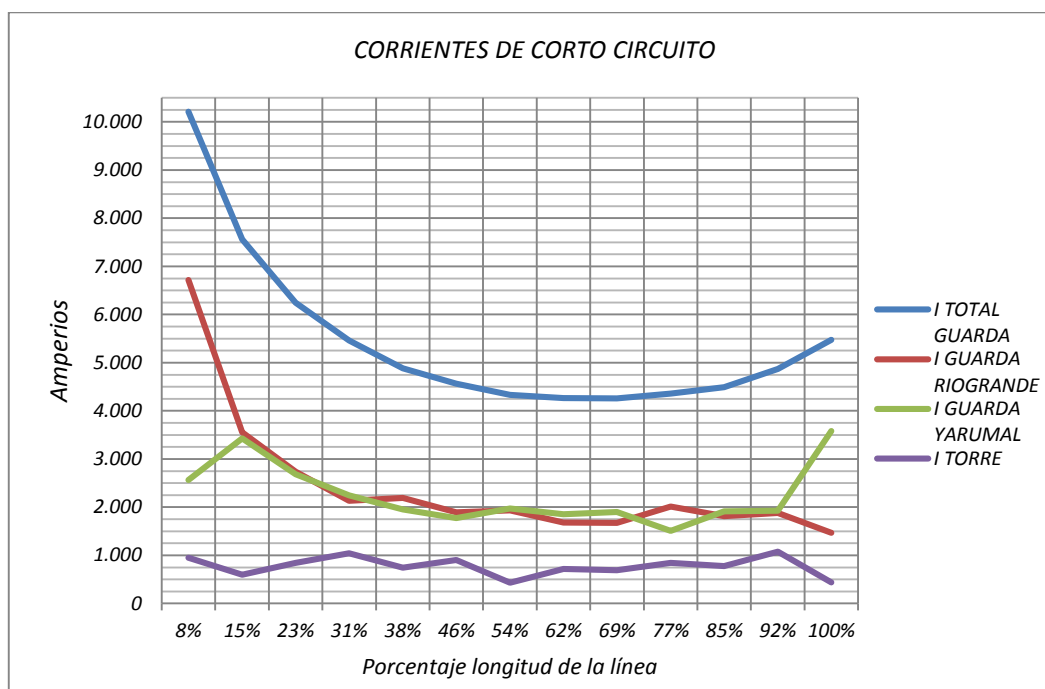
Figura 9. Parámetros cable acero galvanizado 3/8"

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados:

Rio Grande - Yarumal II (Guarda Acero Galvanizado 3/8") RPT= REAL													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Yarumal II
Total	10212,0	7561,8	6247,5	5458,2	4881,1	4564,9	4331,0	4264,8	4260,4	4355,1	4491,2	4871,5	5474,4
Guarda hacia Rio Grande	6717,7	3550,8	2739,1	2132,2	2191,0	1893,3	1931,0	1683,3	1676,8	2013,6	1814,3	1877,8	1465,4
Guarda hacia Yarumal II	2566,6	3427,5	2681,5	2247,5	1955,4	1772,3	1970,7	1855,1	1902,1	1510,2	1911,4	1926,4	3581,1
Torre	948,7	596,2	843,7	1043,1	742,2	899,6	430,2	713,7	688,2	840,1	774,0	1072,4	438,6

Tabla 1. Corrientes de falla RPT_REAL Guarda_3/8"

En la Gráfica 1 se pueden observar los valores reportados en la tabla 1, los cuales permiten evidenciar el comportamiento de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.

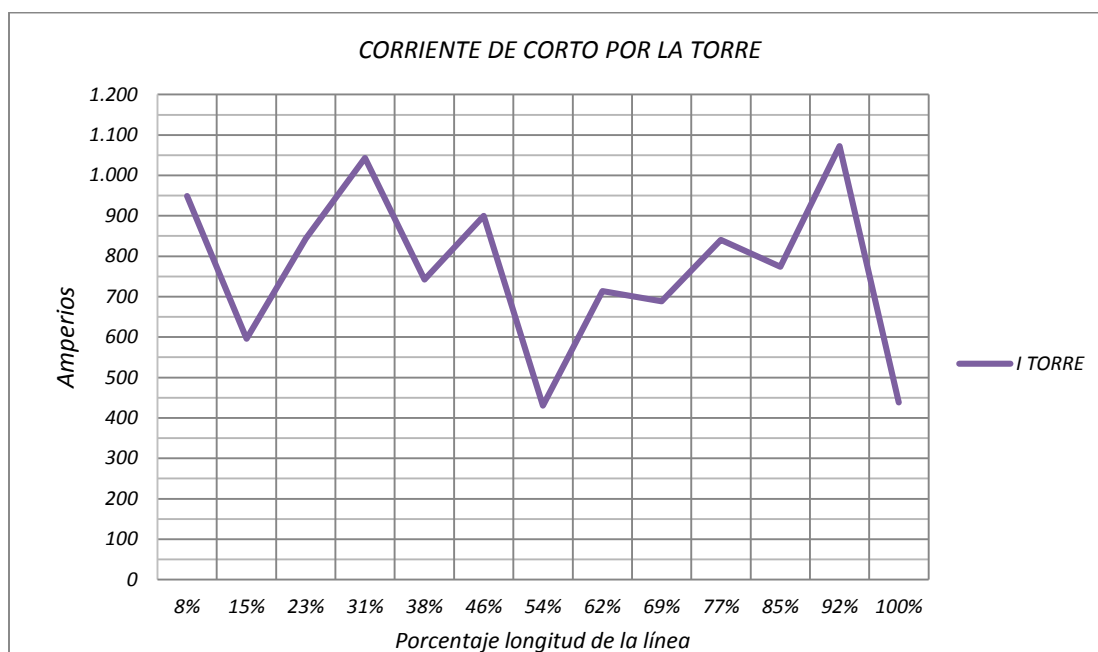


Gráfica 1. Corrientes de falla Rio Grande-Yarumal II RPT_Real Guarda_3/8"

Se observa claramente que la distribución de las corrientes es poco uniforme y presenta cambios muy fuertes de un tramo a otro, lo anterior se debe a que la resistencia de puesta a tierra no es homogénea y varía a lo largo de toda la ruta de la línea de transmisión, generando que en cada punto de torre la distribución de las corrientes en el cable de guarda y en la estructura sea distinta.

En la Gráfica 2 se muestra de manera más detallada las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utilice un cable de guarda de acero galvanizado 3/8”.

Lo anterior con el fin de identificar de manera más exacta el intervalo de valores donde se están distribuyendo dichas corrientes.



Gráfica 2. Corrientes de falla por las torres (Guarda_3/8”)

En la gráfica se puede observar que la corriente varía fuertemente de un punto de falla a otro, lo anterior debido a que la resistencia de puesta a tierra no es homogénea y cambia considerablemente de un sitio de torre a otro. El valor de corriente de falla más alto se evidencia en el punto 12, el cual se encuentra próximo a la subestación Yarumal II y es aproximadamente de 1080 A y el mínimo valor de corriente de falla se encuentra próximo al punto 8 (mitad de la línea) y es aproximadamente de 420 A.

II. Cable de guarda Aluminum Clad Steel Wire (ACSW) 7 No. 8 AWG

Para el segundo caso se utilizó en la simulación un cable de guarda Alumoweld 7 No. 8 AWG. Dicho cable es de acero aluminizado, el cual tiene una resistencia eléctrica en DC menor que la del cable de acero galvanizado 3/8",

En la Figura 10. Parámetros cable 7 No. 8 AWG se muestran los parámetros eléctricos del 7 No. 8 AWG

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	4	0	0.978	1.463	0	38.7	17

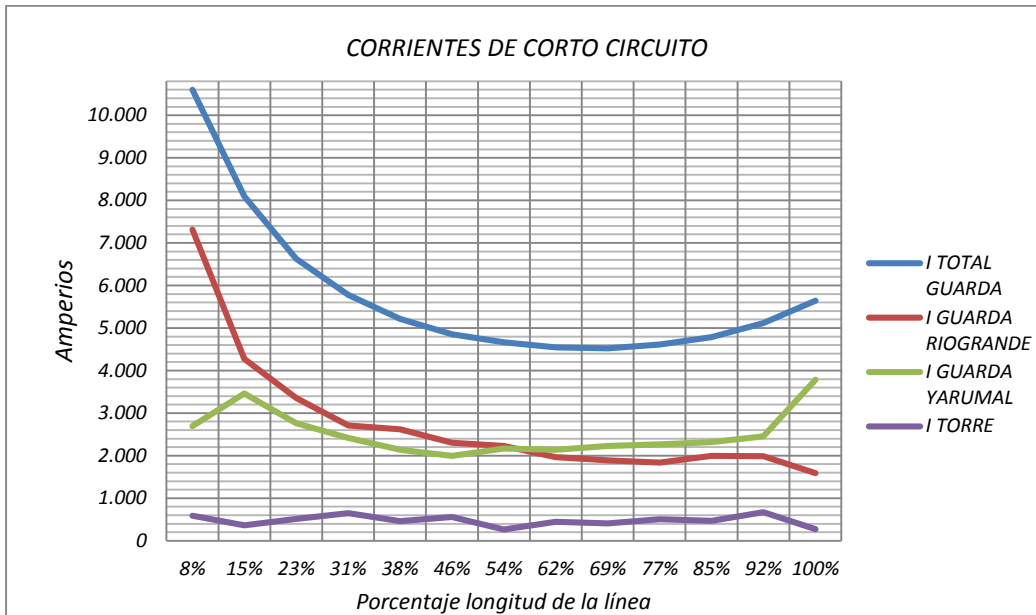
Figura 10. Parámetros cable 7 No. 8 AWG

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados:

Rio Grande - Yarumal II (Guarda 7 No. 8 AWG) RPT= REAL													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Yarumal II
Total	10599,0	8092,2	6631,1	5775,0	5215,8	4849,8	4662,0	4548,3	4525,3	4610,0	4786,9	5113,8	5642,7
Guarda hacia Rio Grande	7312,3	4270,9	3358,9	2712,0	2621,3	2299,9	2227,7	1962,8	1888,5	1836,7	1995,3	1988,5	1586,1
Guarda hacia Yarumal II	2694,2	3459,0	2758,9	2414,8	2135,3	1991,3	2168,6	2140,3	2225,9	2267,3	2319,8	2456,6	3785,1
Torre	592,2	362,3	513,4	648,2	459,2	558,6	265,7	445,3	410,9	505,9	471,8	668,6	271,5

Tabla 2. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_7 No. 8 AWG

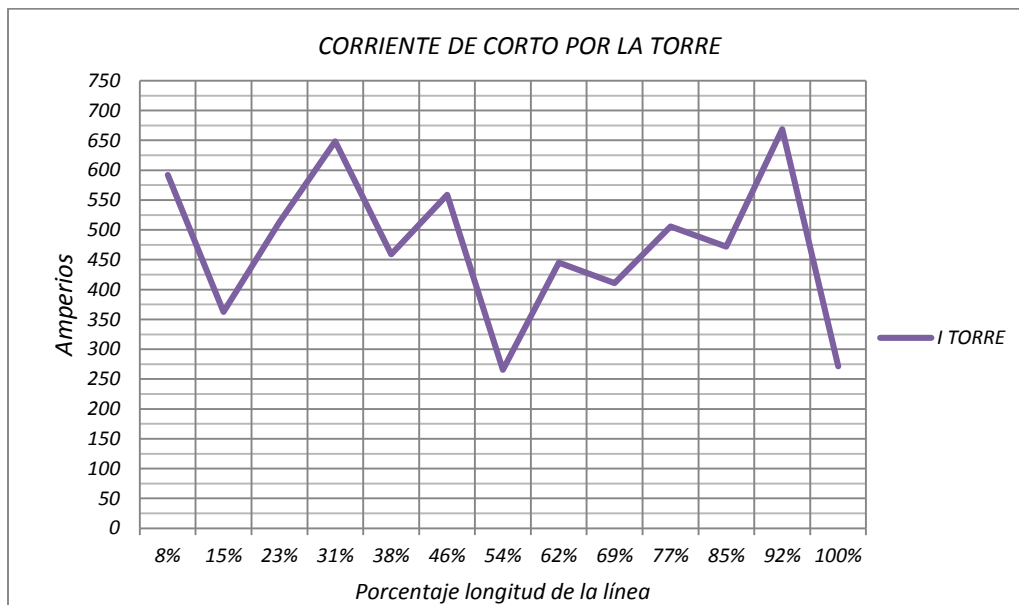
En la Gráfica 3 Se muestran los valores reportados en la tabla 2, los cuales permiten evidenciar el comportamiento y la distribución de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.



Gráfica 3. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_7 No. 8 AWG

En la gráfica se puede evidenciar que el cable 7 No. 8 AWG ayuda a disminuir notablemente en comparación con el cable 3/8" la corriente que se disipa a través de las estructuras de la línea de transmisión en caso de falla.

En la Gráfica 4 se muestra de manera más detallada las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utilice un cable de guarda 7 No. 8 AWG. Lo anterior con el fin de identificar de manera más exacta el intervalo de valores donde se están distribuyendo dichas corrientes.



Gráfica 4. Corrientes de falla por las torres Guarda_7 No. 8 AWG

Nuevamente la corriente presenta un comportamiento muy similar al caso anterior, se observan grandes variaciones de un punto de análisis a otro, pero la magnitud de las corrientes para este caso disminuye notablemente obteniendo un intervalo de valores entre 260 A y 670 A.

III. Cable de guarda ACSR MINORCA HS

Para el tercer caso se utilizó en la simulación un cable de guarda ACSR MINORCA HS, el cual es muy utilizado como cable de guarda en líneas de transmisión de alta tensión (> 230 kV).

El cable ACSR MINORCA HS es un cable de aluminio desnudo con alma de acero el cual tiene una resistencia en DC menor que la del cable de acero 3/8".

En la Figura 11 se muestran los parámetros del ACSR MINORCA HS.

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	4	0.366	0.61	0.5142	0	38.7	17

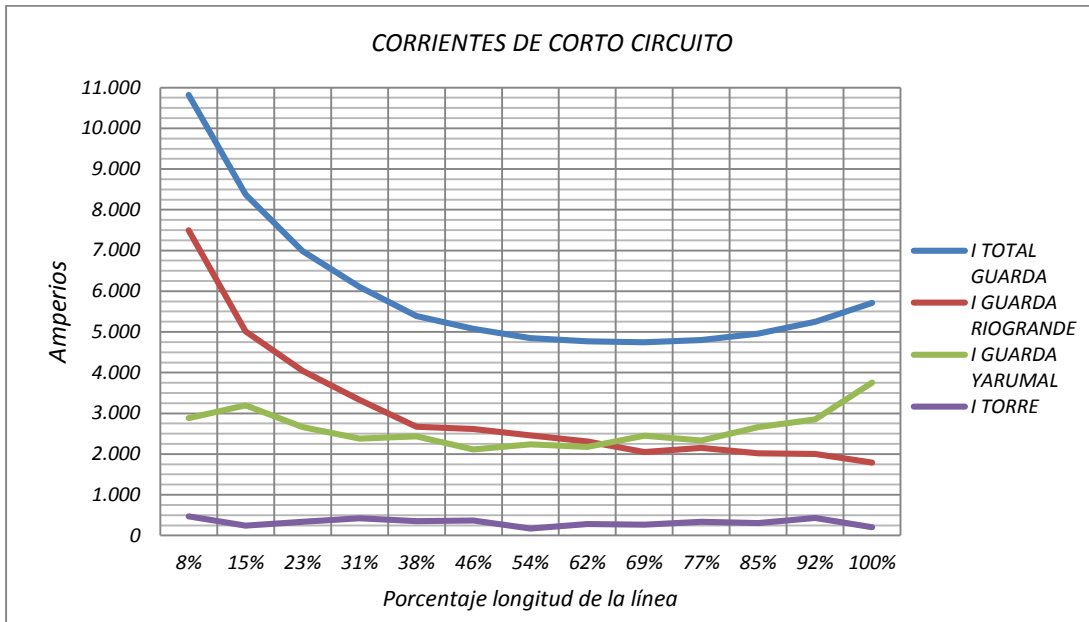
Figura 11. Parámetros cable ACSR MINORCA HS

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados:

Rio Grande - Yarumal II (Guarda ACSR MINORCA) RPT= REAL													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Yarumal II
Total	10822,0	8380,2	6985,3	6104,0	5392,3	5078,4	4847,7	4766,4	4745,0	4804,0	4958,3	5250,7	5713,8
Guarda hacia Rio Grande	7495,3	5012,3	4046,2	3332,2	2669,4	2612,5	2454,6	2313,1	2048,2	2153,1	2021,5	1999,9	1790,8
Guarda hacia Yarumal II	2883,8	3197,0	2659,0	2383,3	2434,2	2115,3	2241,7	2177,5	2448,0	2330,5	2660,2	2851,1	3756,6
Torre	472,8	242,6	335,4	423,9	352,5	365,3	173,3	284,0	266,7	339,1	304,8	433,6	203,9

Tabla 3. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_ACSR Minorca

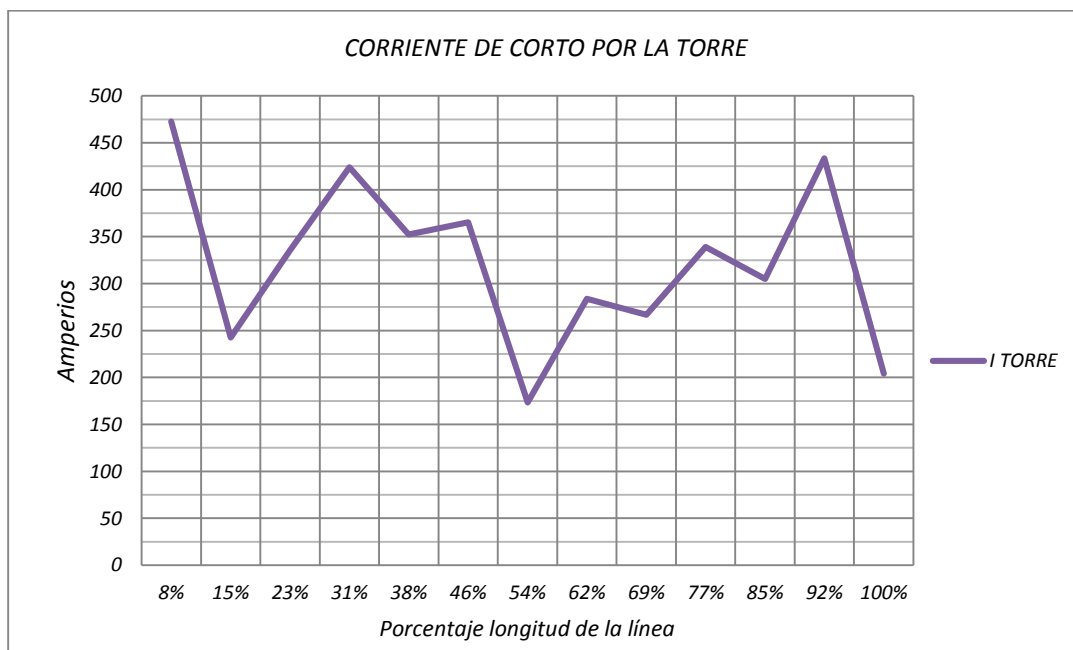
En la Gráfica 5 se pueden observar los valores reportados en la tabla 1, los cuales permiten evidenciar el comportamiento de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.



Gráfica 5. Corrientes de falla_RPT_Real Guarda_ACSR MINORCA

En la gráfica se puede evidenciar que el cable ACSR MINORCA HS ayuda a disminuir notablemente en comparación con el cable ACSW 7 No. 8 AWG las corrientes de falla que se disipan por el cable de guarda y las estructuras de la línea de transmisión.

En la Gráfica 6 se muestra de manera más detallada las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utilice un cable de guarda ACSR MINORCA HS.



Gráfica 6. Corrientes de falla por las torres_Guarda ACSR Minorca

En la gráfica se evidencia que al ir cambiando el cable de guarda por uno con menor resistencia en DC se disminuye la magnitud de la corriente que se disipa a través de las torres de la línea de transmisión, para este caso se obtiene un intervalo para la corriente de falla entre 470 y 170 A.

IV. Cable de guarda OPGW

Para el cuarto y último caso se utilizó en la simulación un cable de guarda con fibras ópticas OPGW.

En la Figura 12 se muestra un corte transversal del cable OPGW, el cual permite identificar cada uno de los componentes.

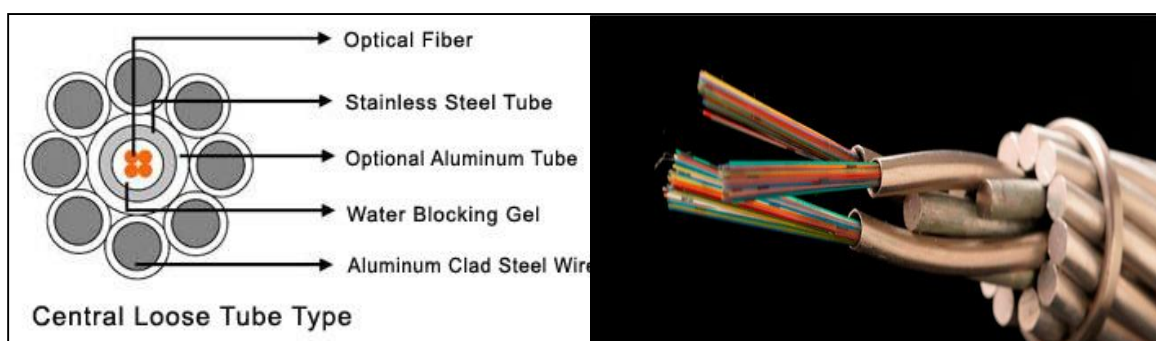


Figura 12. Cable OPGW

El cable Optical Ground Wire (OPGW) es un cable compuesto por un tubo de aluminio, cubierto por hilos de aluminio, acero aluminizado o acero galvanizado, el cual lleva en su núcleo hilos de fibra óptica que se usan para transmitir datos. De todos los cables que se probaron este es el que tiene el menor valor de resistencia eléctrica en DC, por lo cual se espera que tenga el mejor comportamiento con respecto a lo requerido en nuestro caso de análisis.

En la Figura 13 se muestran los parámetros del cable OPGW

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	4	0	0.14	0.45	0	38.7	17

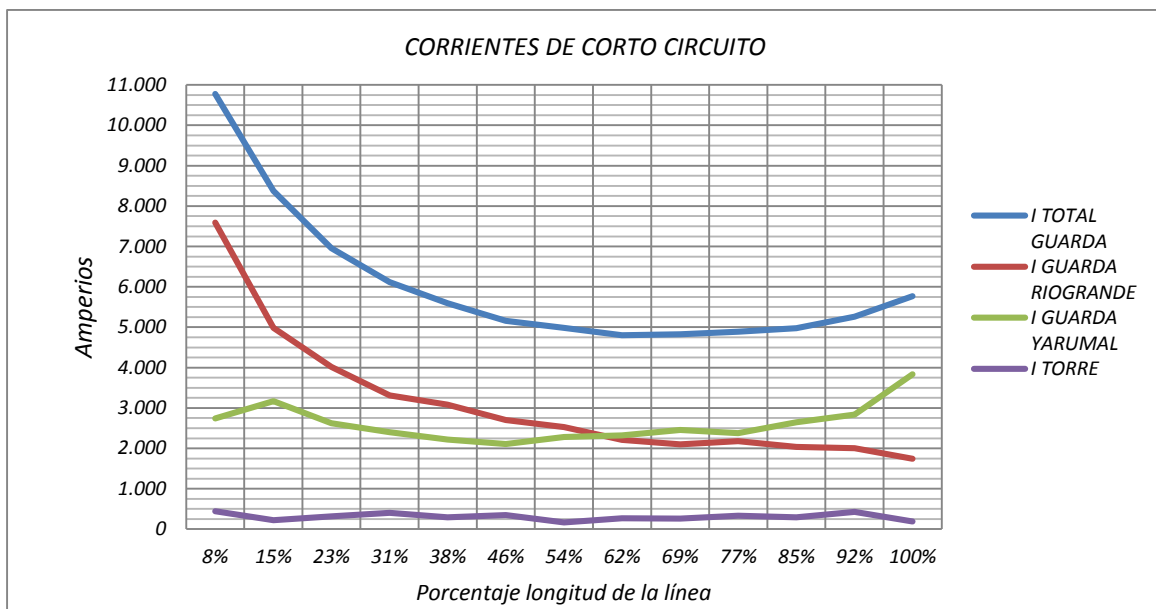
Figura 13. Parámetros cable OPGW

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados:

Rio Grande - Yarumal II (Guarda OPGW) RPT= REAL													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Yarumal II
Total	10775,0	8372,0	6956,7	6114,8	5591,0	5161,9	4981,6	4803,7	4826,2	4885,5	4976,8	5263,8	5768,9
Guarda hacia Rio Grande	7589,4	4983,6	4017,4	3309,5	3081,7	2703,0	2531,2	2211,9	2102,4	2178,6	2035,4	2000,6	1742,4
Guarda hacia Yarumal II	2744,7	3166,3	2625,7	2398,8	2217,4	2106,9	2282,8	2321,5	2459,6	2377,2	2647,8	2839,3	3838,5
Torre	440,7	222,1	313,7	406,51	291,9	351,9	167,6	270,3	264,2	329,7	293,6	423,8	187,97

Tabla 4. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_OPGW

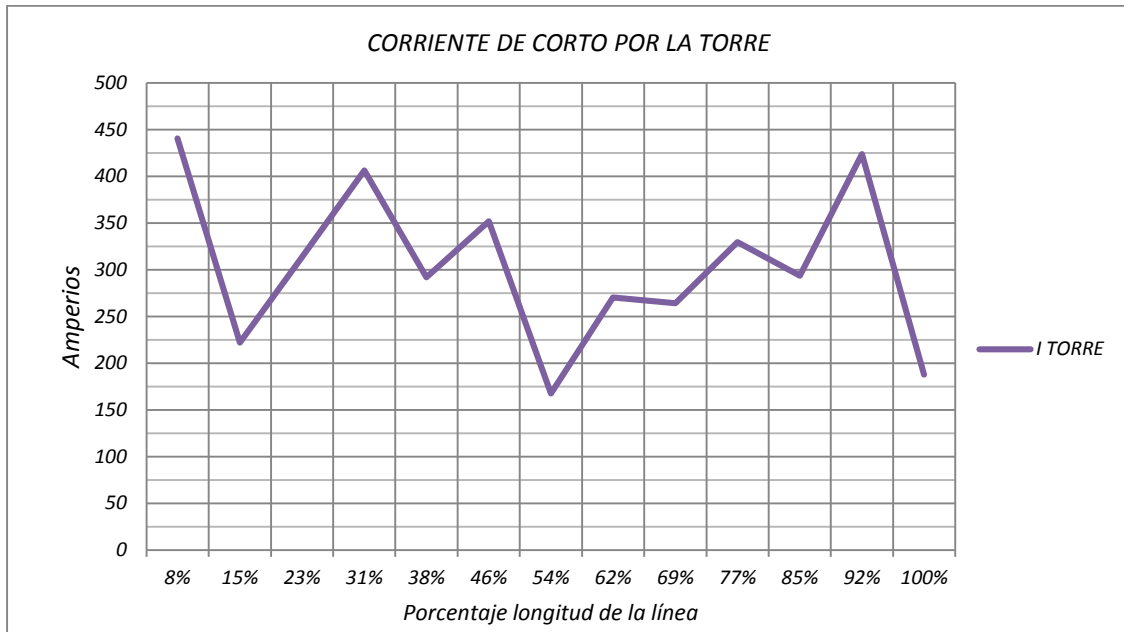
En la Gráfica 7 se muestra la gráfica de los valores reportados en la tabla 4, los cuales permiten evidenciar el comportamiento y la distribución de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.



Gráfica 7. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_OPGW

En la gráfica se puede evidenciar que el cable OPGW debido a su baja resistencia en DC es el que presenta el mejor comportamiento con relación a la disipación de corrientes a través de la estructura en caso de falla. Lo anterior debido a que la resistencia eléctrica equivalente en DC de los cables de guarda es mucho menor que la de las torres, por lo tanto se dispara un mayor valor de la corriente de corto por los cables de guarda.

En la Gráfica 8 se muestra de manera más detallada las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utilice un cable de guarda OPGW.



Gráfica 8. Corrientes de falla por las torres_Guarda OPGW

A pesar que la variación de la corriente en todo el tramo de la línea es fuerte, con el cable de guarda OPGW se logra disminuir la magnitud de la corriente a un nivel notablemente bajo, el cual que permite optimizar la construcción de los sistemas de puesta a tierra.

Para este caso tenemos un valor máximo de corriente de falla por las torres de 440 A y un valor mínimo de 160 A.

CASO B: Resistencia de puesta a tierra igual para todos los sitios de torre.

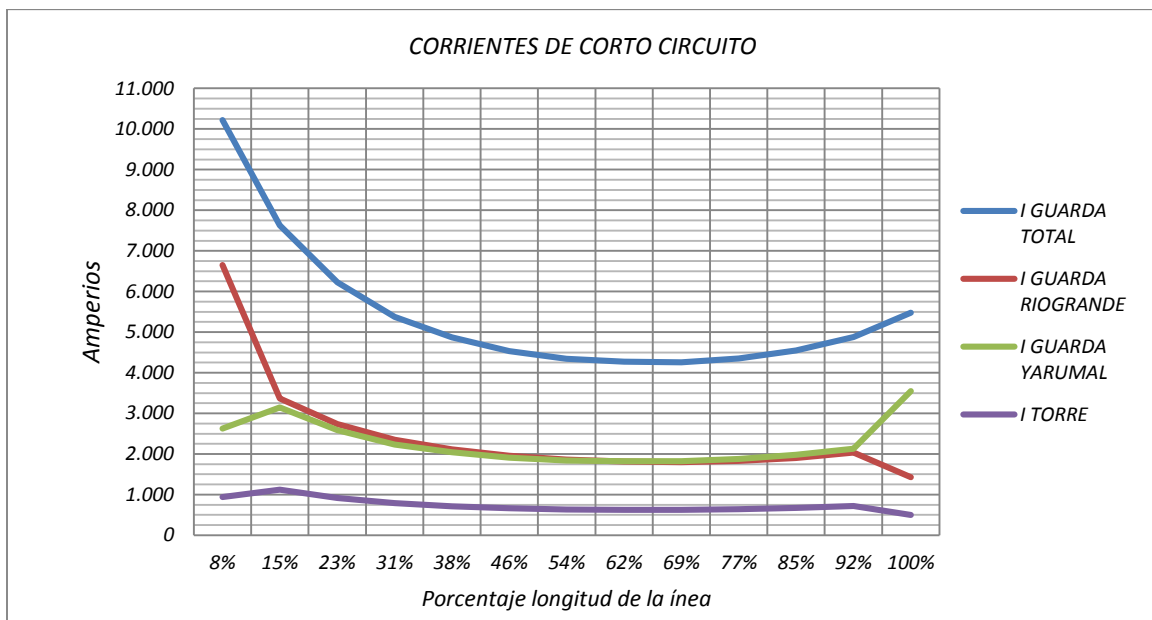
Para este caso se configurará la resistencia de puesta a tierra de cada una de las torres en 20 Ω y se utilizará un cable de guarda de acero galvanizado 3/8".

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados:

Rio Grande - Yarumal II (Guarda 3/8") RPT= 20 Ω													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Yarumal II
Total	10217,0	7625,2	6226,2	5378,0	4870,2	4534,7	4343,6	4268,9	4256,8	4352,6	4550,3	4880,7	5477,0
Guarda Rio Grande	6654,9	3368,7	2735,7	2350,2	2112,8	1957,9	1864,3	1818,5	1802,1	1828,6	1901,5	2034,8	1428,0
Guarda Yarumal	2628,2	3147,4	2583,4	2234,1	2042,2	1908,7	1842,2	1821,3	1825,8	1880,2	1977,2	2127,6	3548,2
Torre	938,1	1124,5	918,3	793,8	715,2	668,2	637,1	629,1	628,9	643,7	671,6	718,3	500,8

Tabla 5. Corrientes de falla RPT_20Ω Guarda_3/8"

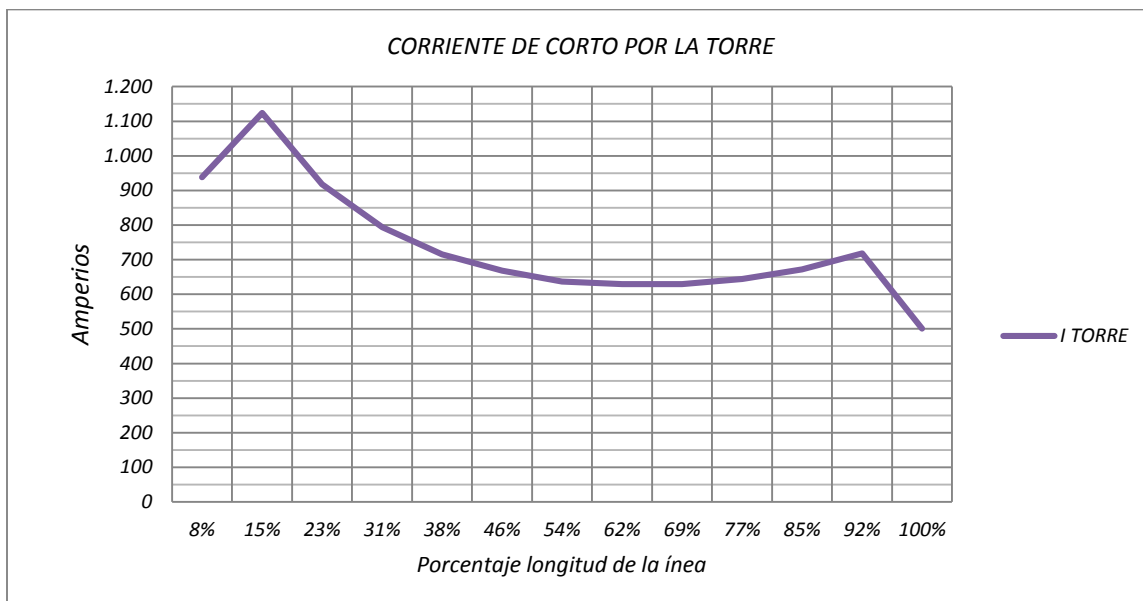
En la Gráfica 9 se pueden observar los valores reportados en la tabla 5, los cuales permiten evidenciar el comportamiento de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.



Gráfica 9. Corrientes de falla RPT_20Ω Guarda_3/8"

En la gráfica se evidencia que las corrientes se distribuyen uniforme y homogéneamente a través de toda la línea de transmisión, lo anterior debido a que al momento de la falla la impedancia equivalente que ve el sistema va aumentando pero en la misma proporción lo que implica también que la corriente se distribuya proporcionalmente a través de los caminos existentes.

En la Gráfica 10 se muestra de manera más detallada las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utiliza un cable de guarda de acero galvanizado 3/8" y una RPT igual para todas las torres.



Gráfica 10. Corrientes de falla por las torres Guarda_3/8" RPT_20Ω

Se evidencia una distribución uniforme sin picos fuertes y manteniendo valores muy aproximados punto a punto, adicionalmente se observa que la magnitud de la corriente de falla en cada uno de los puntos de análisis es muy similar al caso en que se utiliza el mismo cable de guarda pero con la RPT de diseño para cada uno de los sitios de torre. Por lo tanto se puede concluir que tener un terreno con una resistividad muy similar no impacta considerablemente la magnitud de las corrientes que se distribuyen a través del cable guarda o las torres al momento de una falla.

CASO C: Cambio del nivel de falla en un extremo de la línea de transmisión.

Para verificar el comportamiento de las corrientes de falla en el sistema se decide cambiar el nivel de falla en uno de los extremos de la línea de transmisión, simulando la subestación Barbosa en cambio de la subestación Yarumal II.

La subestación Barbosa es una subestación ubicada al Norte del departamento de Antioquia la cual tiene un nivel de falla mayor al de la subestación ya modelada. Adicionalmente se considerará en las simulaciones las resistencias de puesta a tierra calculadas en la ingeniería de detalle.

En la Figura 14 se ilustran los parámetros eléctricos de la subestación Barbosa.

SUBESTACIÓN BARBOSA

VALORES MÁXIMOS DE Icc y EQUIV. X/R

REACTANCIA
 Trans (X'd)
 Subtrans (X"d)

BARRAJE	kV	Icc y MVA CORTOCIRCUITO				EQUIVALENTES R y X				
		LLL [kA]	LLL [MVA]	LG [kA]	LG [MVA]	R1 [OHM]	X1 [OHM]	X/R	R0 [OHM]	X0 [OHM]
44_T1	44,34	3.73	284	5.07	386	0,5305	6,8374	12,8887	0,0358	1,4235
44_T2	44,26	1.18	89	0.00	0.000	1,5268	21,6731	14,1954		
110	115,18	11.67	2223	12.53	2388	0,8286	5,6371	6,8034	0,3147	4,519
220	234,65	16.88	6433	15.77	6009	1,1218	7,9458	7,0831	1,4709	9,6092
44_AT	45,98	6.82	519	0.44	33	0,219	3,8861	17,7459	172,0599	44,5154
13.2_T2	13,45	6.34	144	8.35	190	0,1091	1,2198	11,1761	0,0084	0,3392
6.6_T1	6,38	15.94	175	0.00	0.000	0,0151	0,2307	15,2518		

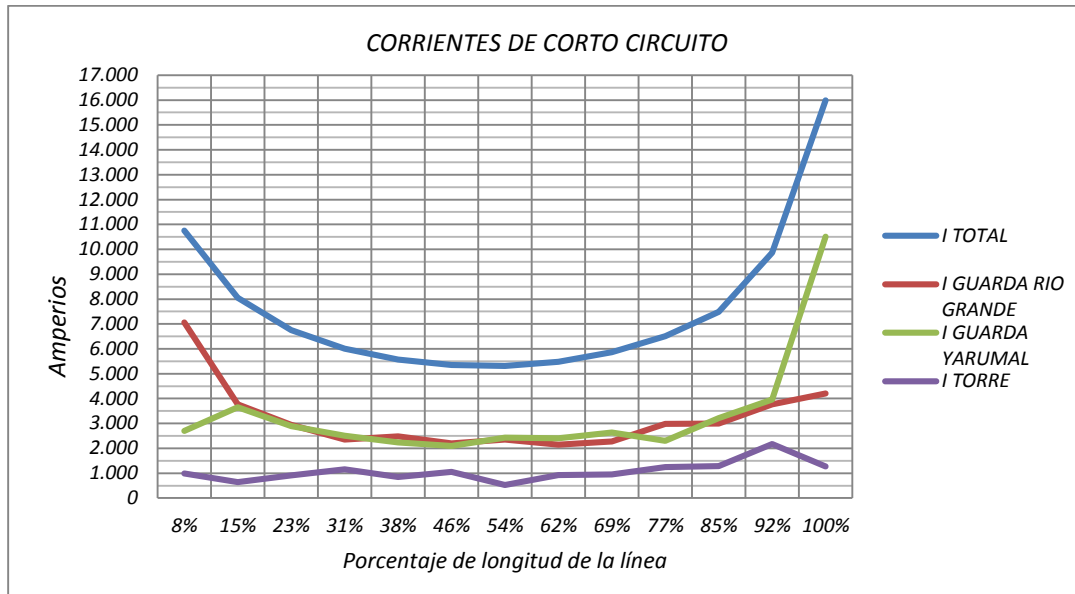
Figura 14. Parámetros eléctricos subestación Barbosa

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados.

Rio Grande - Barbosa (Guarda 3/8") RPT= REAL Y L= 52,9 km													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Barbosa
Total	10748,0	8045,3	6750,3	6004,8	5563,5	5347,1	5313,6	5482,0	5858,7	6513,6	7484,2	9862,6	15988,0
Guarda hacia Rio Grande	7054,9	3773,4	2950,8	2352,3	2482,6	2200,8	2348,6	2145,5	2281,4	2984,8	2993,8	3763,6	4204,7
Guarda hacia Barbosa	2703,0	3647,3	2897,8	2503,7	2236,6	2092,6	2433,9	2410,4	2631,6	2299,0	3220,0	3959,0	10513,0
Torre	992,6	639,6	912,9	1159,2	845,0	1054,7	531,1	926,1	945,7	1250,9	1287,9	2170,9	1275,2

Tabla 6. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_3/8"

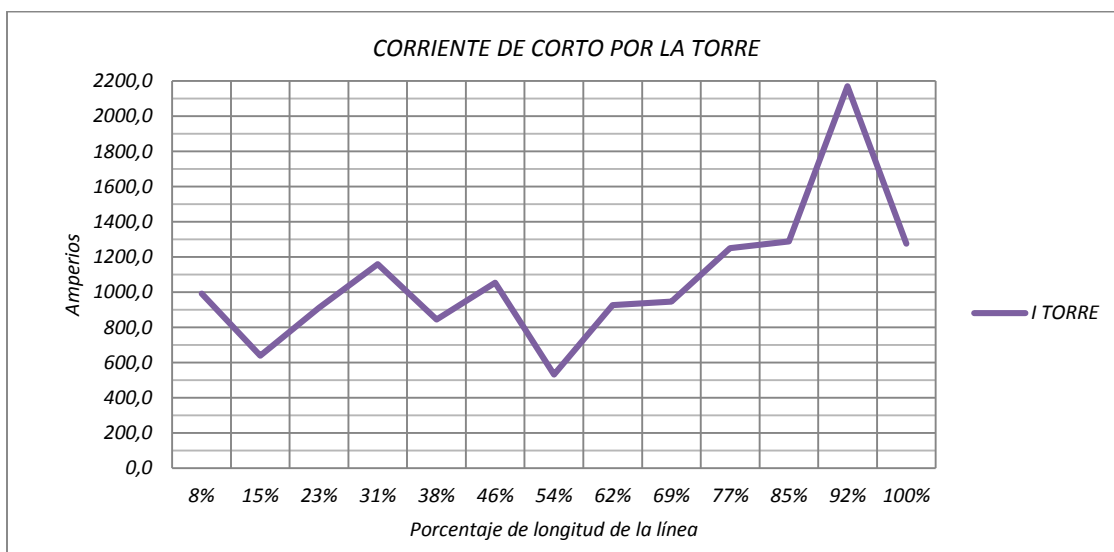
En la Gráfica 11 se pueden observar los valores reportados en la tabla 6, los cuales permiten evidenciar el comportamiento de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.



Gráfica 11. Corrientes de falla RPT_Real Guarda_3/8"

En la gráfica se evidencia que el nivel de falla total en los puntos 12 y 13 aumenta aproximadamente 250% con respecto al caso base de análisis (Línea Rio Grande Yarumal II guarda_3/8" RPT_ REAL). Lo anterior permite evidenciar que esta variación afecta fuertemente el sistema generando niveles de corto mayores.

En la Gráfica 12 se muestra de manera más detallada las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utiliza un cable de guarda de acero galvanizado 3/8", una RPT real para todas las torres y se modela la subestación Barbosa en vez de la subestación Yarumal II. Lo anterior con el fin de identificar de manera más exacta el intervalo de valores donde se están distribuyendo dichas corrientes.



Gráfica 12. Corrientes de falla por las torres. Guarda_3/8" RPT_REAL

En la gráfica se evidencia que la corriente de falla que se disipa por las torres aumenta considerablemente, principalmente en los puntos más cercanos a la subestación Barbosa, donde se pueden observar aumentos hasta del 200% en comparación con el caso base (Línea Rio Grande Yarumal II guarda_3/8" RPT_ REAL).

CASO D: Se mantienen las condiciones del CASO C pero se duplica la longitud de la línea de transmisión.

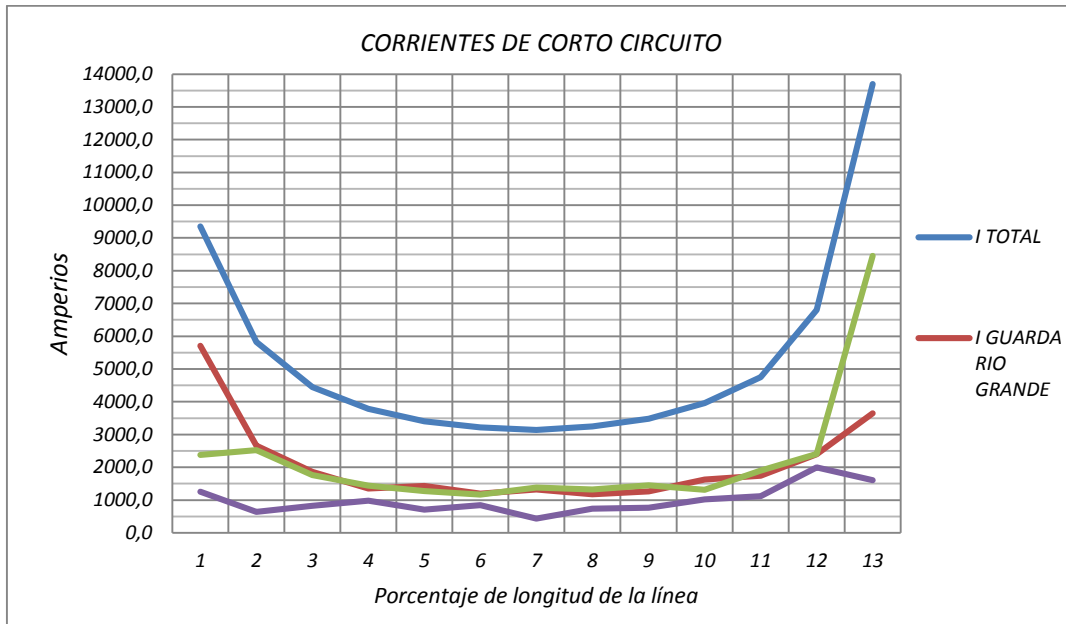
En este caso se modelará la línea de transmisión Rio Grande – Barbosa, con la resistencia de puesta a tierra obtenida en la ingeniería de detalle para cada uno de los sitios de torre y un cable de guarda 3/8", pero se duplicará la longitud de la línea resultando de aproximadamente 100 km.

Después de realizar las simulaciones de falla y las mediciones de corrientes de falla en cada uno de los 12 tramos en los que se subdividió la línea de transmisión Rio Grande Yarumal II, se obtuvieron los siguientes resultados.

Rio Grande - Barbosa (Guarda 3/8") RPT= REAL y L= 100 km													
Corrientes	Rio Grande	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Punto 10	Punto 11	Barbosa
Total	9349,9	5827,1	4451,3	3779,3	3405,9	3212,8	3138,0	3243,7	3478,4	3959,7	4755,5	6803,2	13701,0
Guarda hacia Rio Grande	5713,0	2656,3	1858,5	1355,4	1425,6	1195,5	1321,5	1179,1	1266,6	1626,5	1740,5	2399,1	3651,5
Guarda hacia Barbosa	2378,9	2527,4	1763,2	1443,5	1273,4	1169,9	1382,4	1323,0	1450,0	1311,1	1895,0	2405,6	8448,5
Torre	1258,0	643,5	829,5	980,4	706,9	847,5	434,1	741,6	761,8	1022,1	1120,0	1998,6	1601,5

Tabla 7. Corrientes de falla RPT= REAL Guarda_3/8" L_100km

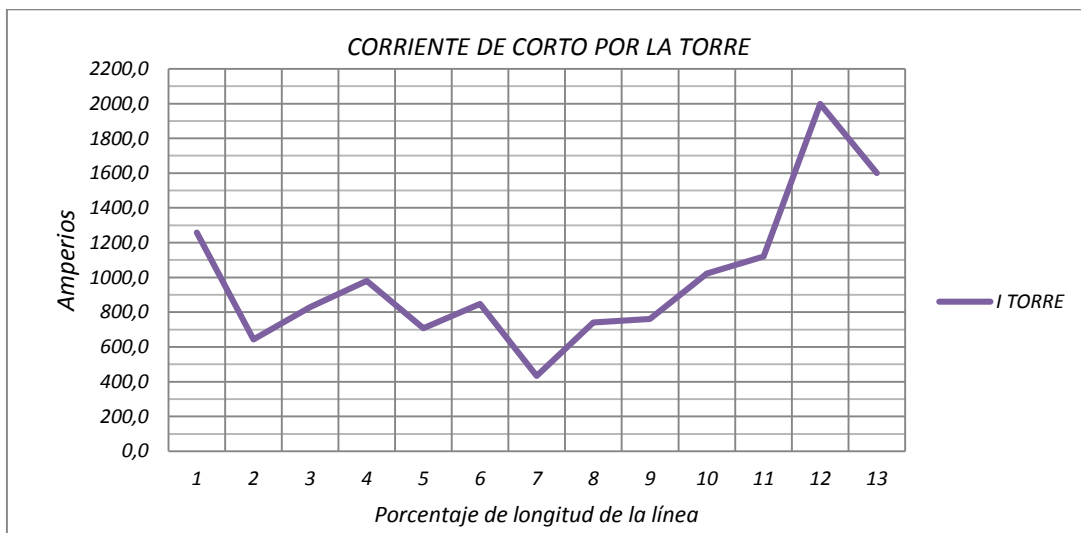
En la Gráfica 13 se pueden observar los valores reportados en la tabla 7, los cuales permiten evidenciar el comportamiento de las corrientes de falla en cada uno de los tramos de análisis definidos para la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.



Gráfica 13. Corrientes de falla RPT_REAL Guarda_3/8" L_100km

El aumento de la longitud provoca que la impedancia equivalente de la línea de transmisión aumente y por consiguiente se presente una oposición mayor al paso de la corriente disminuyendo la magnitud del nivel de falla en todos los puntos de análisis en comparación con el caso anterior (Caso C).

En la Gráfica 14 se muestra de manera más detallada la gráfica de las corrientes de falla disipadas por las torres de la línea de transmisión para el caso en que se utiliza un cable de guarda de acero galvanizado 3/8", se modela la subestación Barbosa en el extremo derecho de la línea y se duplica la longitud. Lo anterior con el fin de identificar de manera más exacta el intervalo de valores donde se están distribuyendo dichas corrientes.



Gráfica 14. Corrientes de falla por las torres. Guarda_3/8" RPT_REAL L_100km

De acuerdo con la gráfica es posible concluir que el aumento de la longitud de la línea genera algunas disminuciones en la corriente de corto al momento de una falla, pero claramente no es una variable tan relevante como para garantizar que las corrientes disipadas por las torres serán pequeñas y de esta manera no se tendrán problemas con las tensiones de toque y paso.

CONCLUSIONES ETAPA 1

- Al momento de analizar líneas de transmisión en las cuales las subestaciones que se interconectan presenten niveles de corto circuito altos, se debe realizar un análisis detallado para la selección del cable de guarda ya que en muchas ocasiones el uso de un cable como el OPGW, ACSR-HS o el ACSW, puede presentar un mejor comportamiento eléctrico que al utilizar los cables normalmente instalados como como el 3/8" o el 7/16"; lo anterior debido a que los primeros tienen una resistencia en DC menor, lo cual facilitará el diseño de los sistemas de puesta a tierra de las estructuras, debido a que la mayor contribución de la corriente al momento de una falla se disipará por los cables y no por la estructura y la malla de tierra.
- Utilizar un cable de guarda como el OPGW u otro con resistencia eléctrica similar no genera un sobrecosto tan impactante como en muchas ocasiones se muestra; a la fecha (27/01/2016) 1 km de cable de acero galvanizado cuesta aproximadamente COP 2'310.000 y un km de cable OPGW está costando COP 7'000.000. En una línea de 50 km se habla de un sobre costo aproximado de 350'000.000 que corresponde a un 1,75% del valor total del proyecto (COP 20.000'000.000 aprox). Tal porcentaje se puede considerar bajo si se tienen en cuenta los beneficios obtenidos; como la disminución de la corriente de falla que se disipa por la torre y el GPR, parámetros que impactan negativamente los voltajes de toque y de paso, los cuales son prioridad No. 1 (RETIE) para garantizar la seguridad de las personas y los seres vivos que están en contacto con la línea de transmisión.

Adicionalmente, al disminuir las corrientes de falla que se disipan por las estructuras se pueden evitar reflexiones de corriente a través de la malla de tierra que generen flámeos inversos y por consiguiente la salida de la línea.

- El uso del cable OPGW también posee la ventaja de los canales de comunicación, los cuales de forma simple pueden utilizarse para la interconexión de las subestaciones, la comunicación de las protecciones etc. Pero una buena planeación permitirá explotar dichos canales de comunicación, como por ejemplo alquilando algunas fibras a las empresas de comunicaciones del sector para todo lo relacionado con el transporte de datos.
- Para el caso en que se modeló la resistencia de puesta a tierra igual para todos los sitios de torre (20 Ω), se pudo evidenciar en las simulaciones que únicamente se generaba una distribución más uniforme punto a punto, es decir en puntos de

análisis adyacentes se presentan variaciones de 20 A a 30 A, mientras que para el caso en que se utilizó la resistencia de puesta a tierra real las variaciones alcanzaron valores hasta de 300 A.

Teniendo en cuenta el objetivo del presente proyecto es válido afirmar que este caso no aporta mucho a la solución que se desea obtener, ya que lograr uniformidad no me ayuda a disminuir los voltajes de toque y de paso a los que estarán sometidos los seres que se encuentran en contacto con la línea.

- Se evidencia que al aumentar la longitud de la línea de transmisión se disminuye la magnitud de las corrientes de falla a través del cable de guarda y las torres debido a que la impedancia equivalente de la línea aumenta, por lo tanto se genera una mayor oposición al flujo lo cual disminuye el nivel de falla a lo largo de toda la línea de transmisión.

7.2 ETAPA 2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MALLAS DE TIERRA EN CYMGRD

Modelado de la malla de tierra objeto de estudio en CYMGRD utilizando los insumos obtenidos en la etapa 1, con el fin de realizar diferentes análisis de sensibilidad que permitan verificar el comportamiento de la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso ante variaciones de parámetros tales como: el diámetro del cable de tierra, la profundidad de enterramiento, la longitud de los contrapesos y su disposición y el material de los electrodos.

Software CYMGRD: Es un aplicativo que permite el análisis y diseño de redes de tierra en subestaciones y líneas de transmisión, fue diseñado principalmente para optimizar el diseño de nuevas mallas y reforzar las existentes, de cualquier geometría, gracias a sus fáciles funciones de evaluación de puntos peligrosos.

El programa funciona conforme a las normas IEEE 80-2000, IEEE-81 1983 e IEEE-837 de 2002.

La licencia del software fue facilitada por Empresas Públicas de Medellín E.S.P para la realización de este trabajo.

Especificaciones técnicas de la malla de tierra

La malla estándar de puesta a tierra que se modeló en CYMGRD tiene las siguientes características:

- Un anillo dispuesto en forma de cuadrado que rodea toda la torre, con una longitud de lado de aproximadamente 8 m, teniendo en cuenta el tamaño promedio de las torres en líneas de transmisión a 110 kV. adicionalmente se coloca un cable que une los lados opuestos del anillo exterior.
- Un anillo adicional (disposición cuadrada) que rodea cada una de las patas de la torre, con una longitud de lado de 2 m, de tal manera que el anillo esté en promedio a 1 m de la pata.
- Profundidad de enterramiento de 0,75 m (de acuerdo con las exigencias del RETIE).
- Cable de acero galvanizado 7/16" grado común.
- Toda la malla está equipotencializada.
- Se instala una jabalina de acero galvanizado de 2,4 m en cada una de las patas de la torre, dicho elemento va interconectado con el anillo de cable de acero galvanizado que se dispuso también alrededor de cada una de las patas.
- El uso de contrapesos se hará únicamente en las situaciones que se requiera controlar la resistencia de puesta a tierra.

En la Figura 15 se muestra el plano de diseño de la malla de puesta construida en la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.

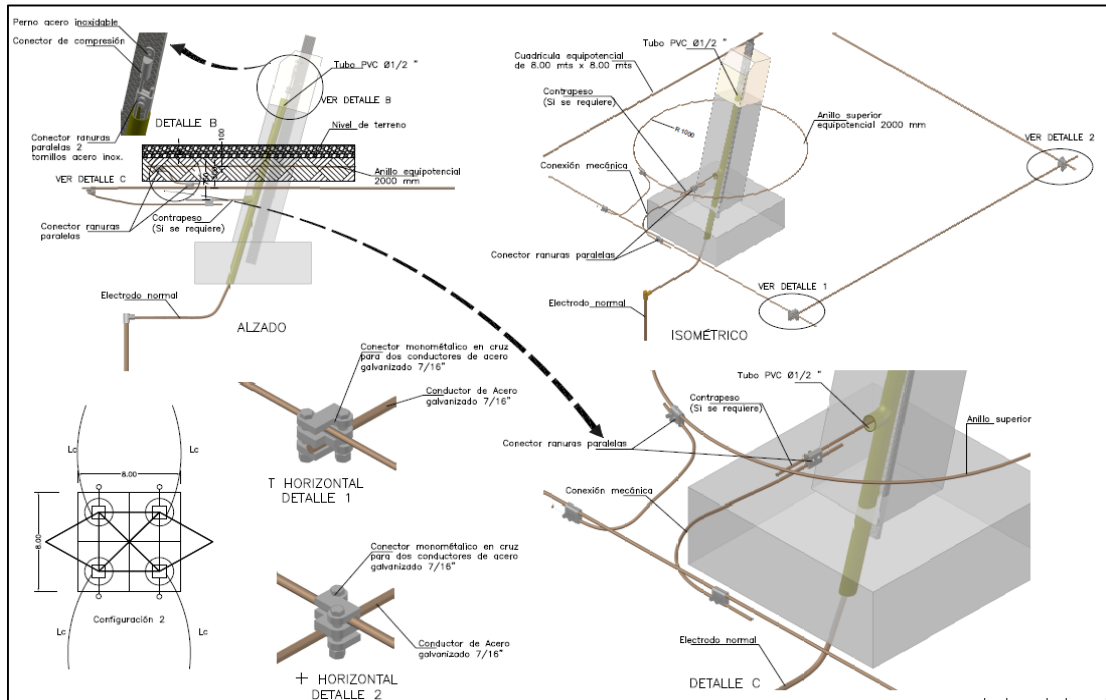


Figura 15. Malla de puesta a tierra estándar objeto de análisis.

En la Figura 16 se muestra un esquema donde se detallan la configuración y las medidas del sistema de puesta a tierra implementado en cada uno de los sitios de torre.

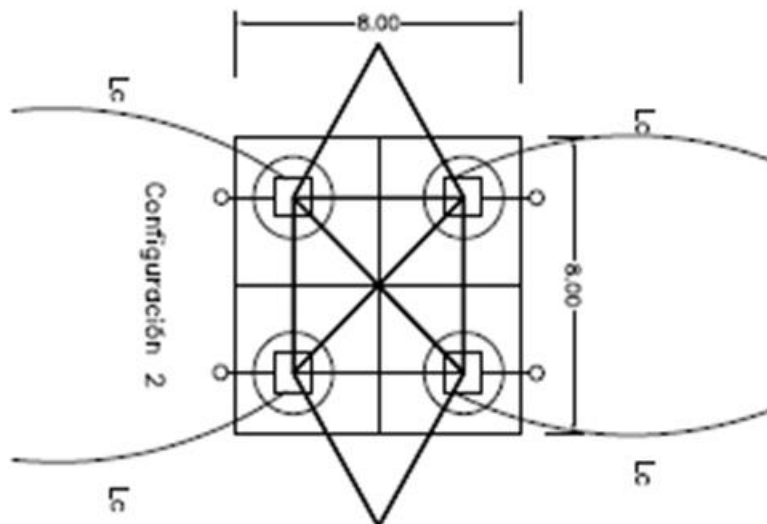


Figura 16. Esquema sistema de puesta a tierra

Adicionalmente en la Figura 17 se muestra el diagrama correspondiente a la malla real de tierra modelada en el software CymGrd

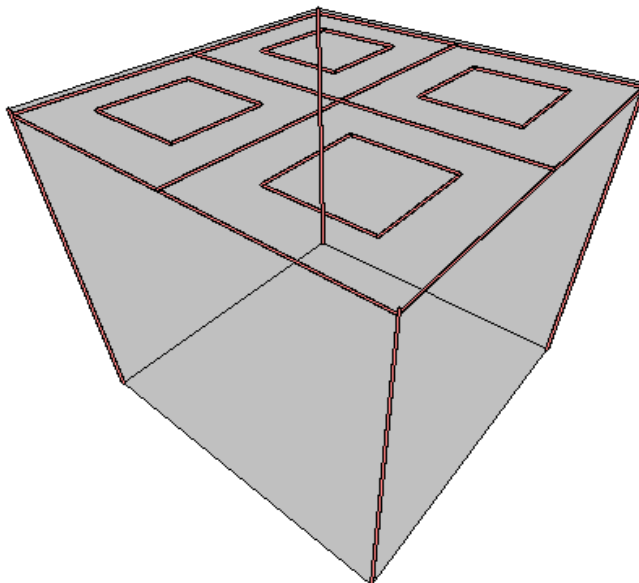


Figura 17. Malla de puesta a tierra estándar objeto de análisis (sin escala).

METODOLOGÍA

Se realizará un análisis de sensibilidad variando algunos de los parámetros relacionados directamente con el comportamiento de la malla de puesta a tierra.

Consideraciones generales

- Torre No. 2 línea Rio Grande-Yarumal II
- Corriente de cortocircuito a través de la torre (I_{cc}): 500 A
- Modelo del suelo de las 2 capas
- Resistividad medida en campo
 - 1m= 447.5 $\Omega \cdot m$
 - 2m= 615.5 $\Omega \cdot m$
 - 3m= 651.5 $\Omega \cdot m$
 - 4m= 607.0 $\Omega \cdot m$
 - 5m= 528.0 $\Omega \cdot m$
- Datos resistividad modelo bicapa (CymGrd)
 - $\rho_1 = 456,07$
 - $\rho_2 = 630,87$
- Duración de la falla: 200 ms
- Peso del cuerpo: 50 kgf
- Temperatura ambiente: 18 °C

- El voltaje de toque se modeló y midió a una distancia de 1 m entre la persona y el montante de la pata (de acuerdo con lo establecido por el RETIE).
- El voltaje de paso se modeló y midió también a una distancia de un metro entre la persona y la estructura, adicionalmente se consideró que la separación entre las piernas de la persona es 1 m.
- Límites voltajes de toque y de paso (obtenidos de la simulación_ Aplican para todos los casos)
 - Voltaje de toque: 436,83 V
 - Voltaje de paso: 969,17 V
- Las figuras que se van a presentar en este numeral tienen las siguientes características generales
 - La línea azul continua representa el perfil de la tensión de toque.
 - La línea verde continua representa el perfil de la tensión de paso.
 - La línea azul punteada representa el valor máximo permisible para la tensión de toque para cada caso en específico.
 - La línea verde punteada representa el valor máximo permisible para la tensión de paso para cada caso en específico.
 - El eje vertical corresponde al voltaje medido en la diagonal de la malla de puesta a tierra de coordenadas (0,0; 8,8).
 - El eje horizontal corresponde a la distancia sobre la diagonal de la malla de puesta a tierra de coordenadas (0,0; 8,8) donde se miden las tensiones de toque y paso.

Caso A:

Se varió el diámetro del electrodo tipo cable con el cual se construye la malla de puesta a tierra, con el fin de verificar si la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso se ven afectados por este cambio.

En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los cables probados. Cabe anotar que todos los cables probados son referencias comerciales.

Diámetro (mm)	RPT (Ω)	Voltaje de paso (Voltios)	Voltaje de toque (Voltios)
9.525 (3/8")	27,23	314,01	1455,90
11.11 (7/16")	27,14	308,82	1392,70
12.7 (1/2")	27,05	302,12	1297,40
19.05 (3/4")	26,79	290,66	1199

Tabla 8. Resultados variación diámetro cable de tierra

En la tabla anterior se observa que la variación del diámetro del cable de tierra tiene poca influencia sobre la resistencia de puesta a tierra, ya que al cambiar de un cable a otro se obtienen cambios de máximo un 3%.

Con relación a los voltajes de toque, se puede observar que con los cables de 3/8", 7/16" y 1/2" se estaban sobrepasando los límites permisible para dicha tensión, pero al momento de usar un cable de 3/4" se obtuvo una mejora considerable de aproximadamente el 24%, la cual permitió ubicar la magnitud de este parámetro dentro del rango permitido.

El voltaje de paso permanece dentro de los límites permitidos en cualquiera de los casos simulados

En las figuras 18, 19, 20 y 21 se muestran los perfiles de los voltajes de toque y de paso obtenidos al variar el diámetro del cable de acero galvanizado con el que se construye la malla de puesta a tierra.

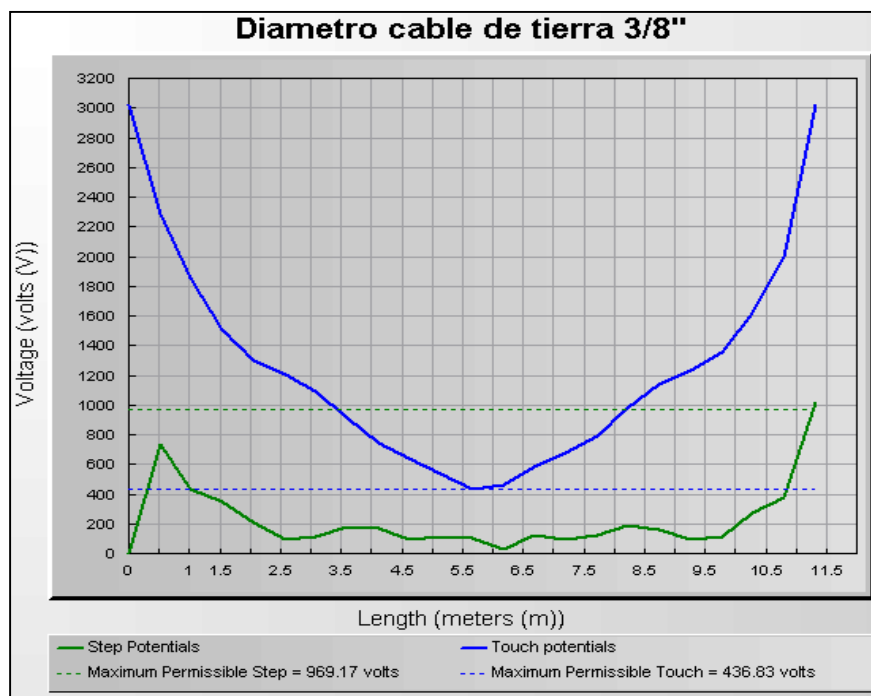


Figura 18. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 3/8"

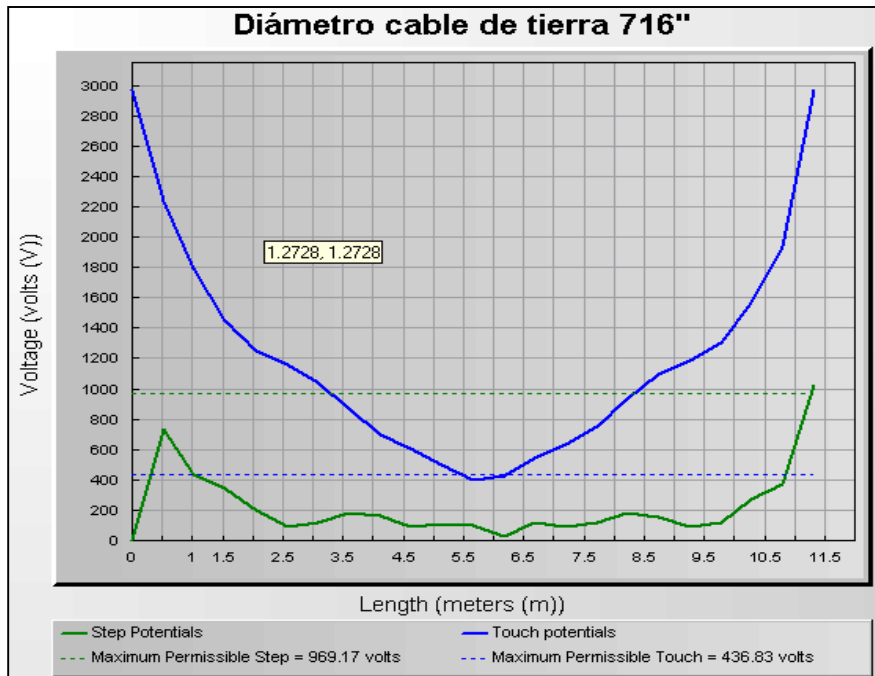


Figura 19. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 7/16"

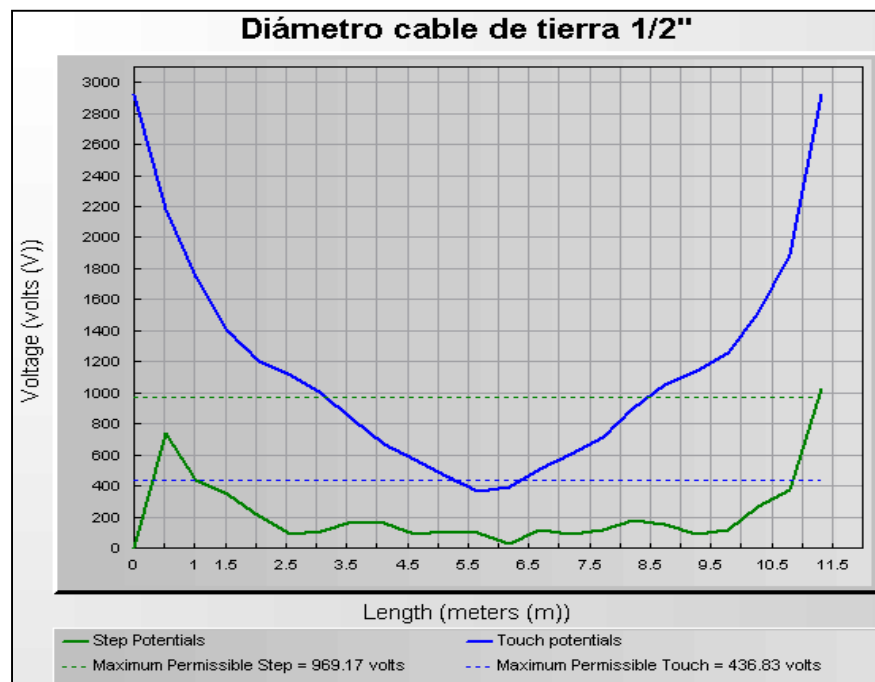


Figura 20. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 1/2"

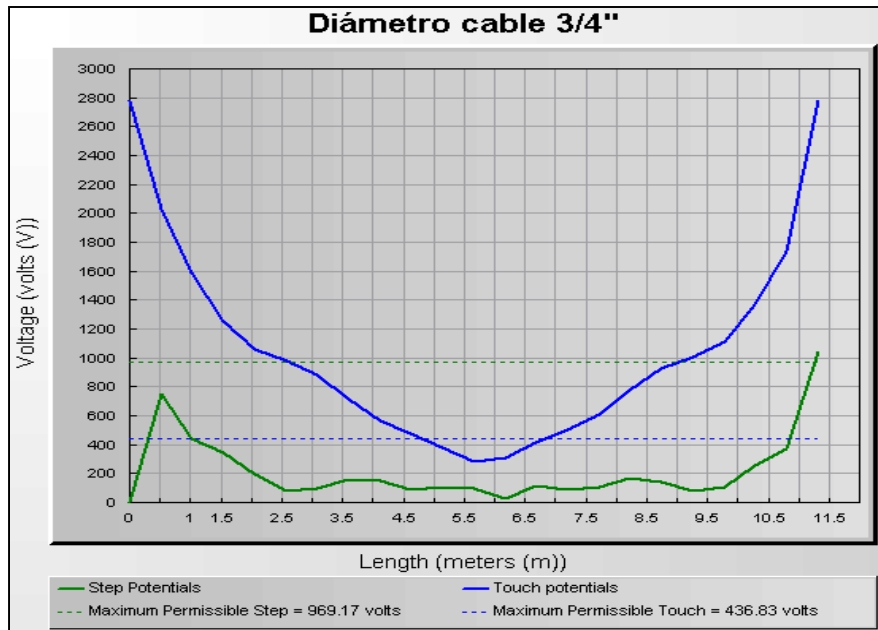


Figura 21. Perfiles Vt y Vp cable de tierra 3/4"

En las figuras anteriores se observa claramente como la curva correspondiente a la tensión de toque va disminuyendo la magnitud a medida que se aumenta el diámetro del cable, incluso en la figura 16 se observa que toda la curva se encuentra por fuera del área permisible, mientras que en la figura 19 ya se tiene un intervalo considerable dentro del área permitida.

Caso B:

Se varió la profundidad de enterramiento de la malla de tierra, con el fin de verificar como la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso se comportan ante dicho cambio. Cabe anotar que el RETIE exige una profundidad mínima de enterramiento de 0,75m.

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los parámetros de análisis en las diferentes profundidades de enterramiento en las que se simulo la malla de puesta a tierra.

Profundidad (m)	RPT (Ω)	Voltaje de paso (Voltios)	Voltaje de toque (Voltios)
0,25	15,19	84,81	371,73
0,50	14,73	15,90	378,98
0,75	14,48	18,55	376,33
1,00	14,70	36,75	520,14

Tabla 9. Resultados variación profundidad de enterramiento

En la tabla se observa que a medida que se aumenta la profundidad de enterramiento la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso comienzan a disminuir, pero también se evidencia que al superar un valor de profundidad (1 m para este caso) comienza a ocurrir un fenómeno que genera que la RPT y los voltajes de toque y de paso comiencen a aumentar, incluso hasta sobrepasar los límites permisibles.

Durante la simulación se optó por realizar un análisis adicional, el cual consistió en cambiar el espesor de la capa superior del suelo de 1 m a 2 m, lo anterior con el fin de evaluar si las alteraciones presentadas en los parámetros de interés estuvieran relacionadas con la ubicación de la malla de tierra exactamente en la frontera entre la capa superior e inferior del modelo de suelo definido.

Después de realizar la verificación del modelo se evidenció que los parámetros de análisis mantienen el mismo comportamiento, lo que indica que los cambios presentados no están relacionados con los parámetros propios de este modelo.

También se evidenció durante las simulaciones que para los casos donde se ubicaba la malla de tierra a una profundidad de enterramiento menor a 0,75 m el comportamiento de los voltajes de toque y de paso se tornaba diferente a la tendencia presentada en los otros casos (entre 0,75 m y 1,0 m), ya que se generaban cambios fuertes en las tensiones de toque y paso en intervalos muy reducidos, lo cual es extraño debido a que las condiciones del suelo y los parámetros eléctricos no se habían variado.

En las figuras 22, 23, 24 y 25 se observa el comportamiento de los voltajes de toque y de paso para cada una de las profundidades de enterramiento analizadas.

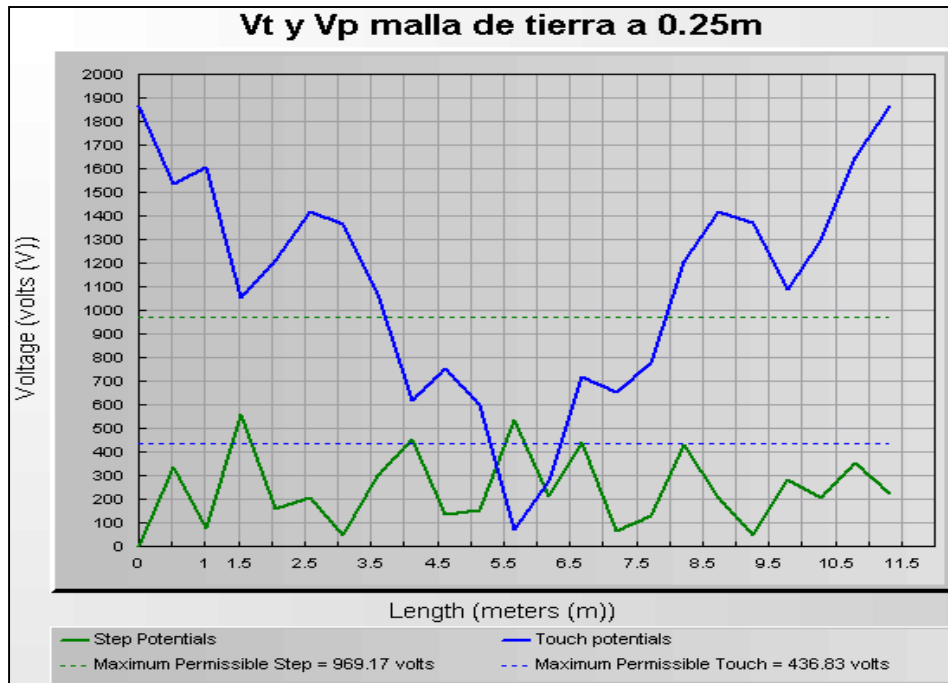


Figura 22. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 0.25m

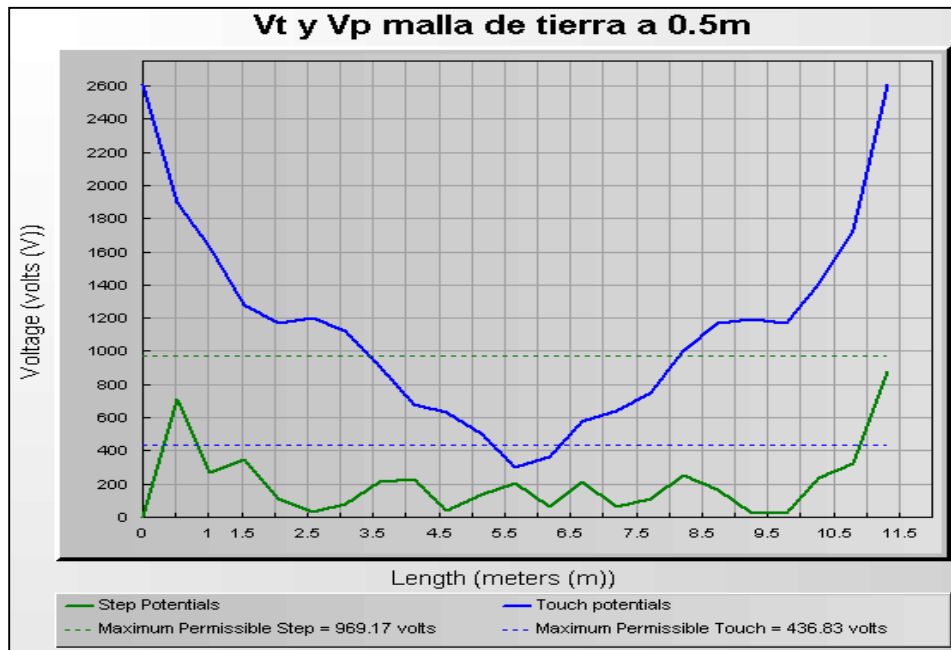


Figura 23. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 0.50m

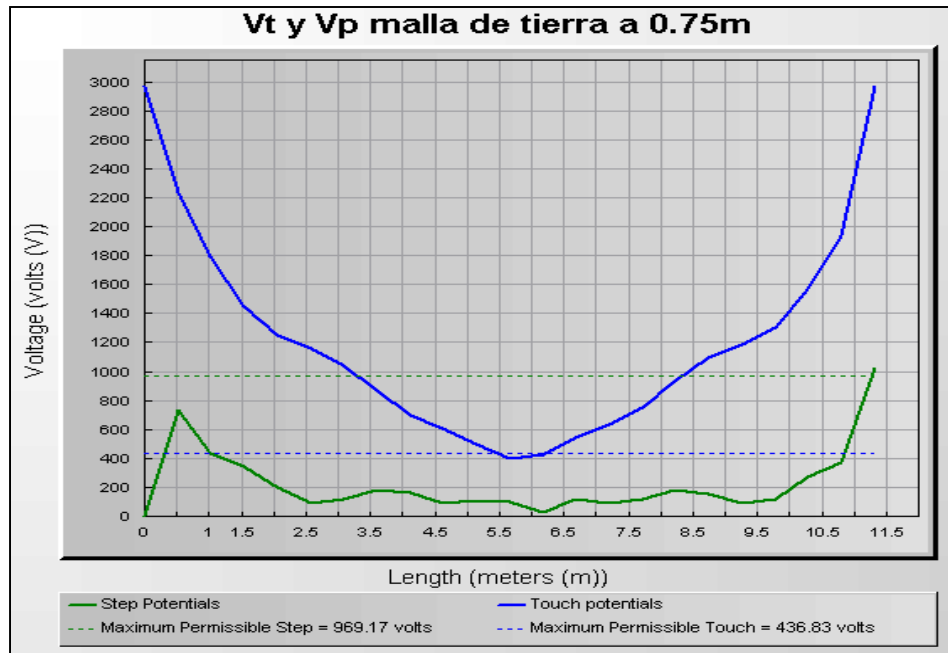


Figura 24. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 0.75m

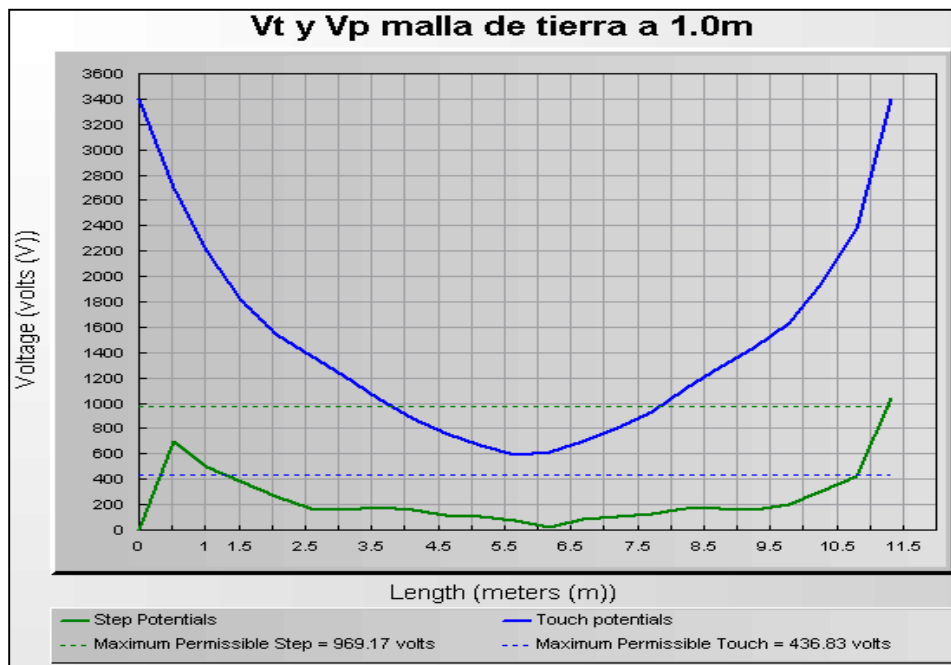


Figura 25. Perfiles Vt y Vp profundidad enterramiento 1.0m

Caso C

Se colocaron contrapesos en cada una de las patas de la torre, equipotencializados con la malla de tierra y la estructura, adicionalmente se varió la longitud de cada uno de ellos en la misma proporción (10 m) con el fin de evidenciar cómo se comporta la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso ante dichas variaciones.

Los contrapesos se disponen con un ángulo de 45° medidos con referencia al eje de la línea de transmisión. Cabe anotar que en campo no siempre se mantiene este ángulo de deflexión al momento de la instalación debido a que en ocasiones la topografía del terreno lo impide o en otros casos el propietario no permite la instalación de dicha manera debido a que el cable sobrepasa la faja de servidumbre, sin embargo, siempre será ideal localizarlos de esta manera, con el fin de cubrir una mayor extensión de área.

En la Figura 26 se muestra el esquema de la malla de puesta a tierra con los respectivos contrapesos fijados a cada una de las patas de la torre.

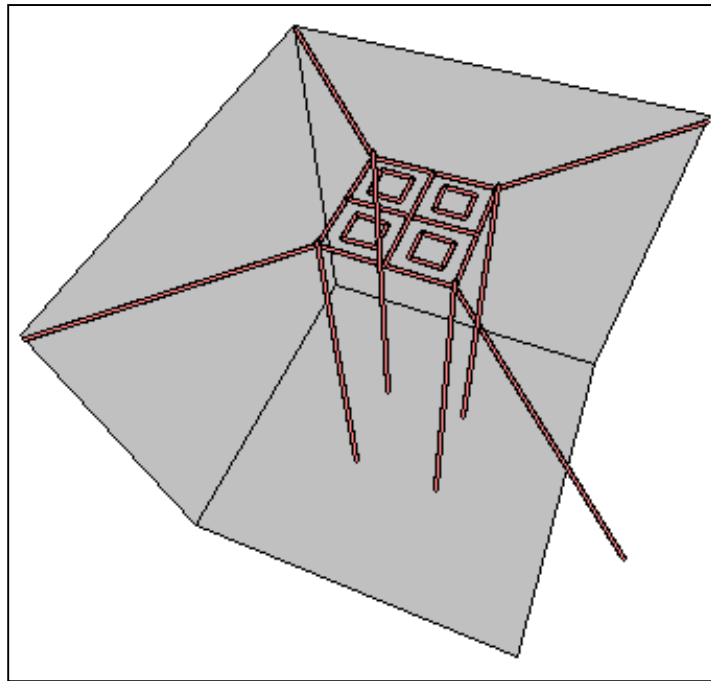


Figura 26. Malla de puesta a tierra con contrapesos

En la Tabla 10 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los parámetros de análisis al variar la longitud de los contrapesos entre 15m y 55m.

Longitud contrapesos (m)	RPT (Ω)	Voltaje de paso (Voltios)	Voltaje de toque (Voltios)
15	14,48	18,55	376,33
25	10,83	2,69	231,31
35	8,68	2,40	162,19
45	7,27	1,55	119,16
55	6,26	0,00	98,91

Tabla 10. Resultados variación longitud de los contrapesos

En los resultados obtenidos se observa que el uso de los contrapesos es uno de los métodos más efectivos para controlar resistencias de puesta a tierra y voltajes de toque y de paso. Se evidenció que es posible obtener disminuciones de la resistencia de puesta a tierra de hasta un 57%, al colocar contrapesos de aproximadamente 50 m.

Con relación a los voltajes de toque y de paso se obtienen mejoras aún mayores, a tal punto que se logra llevar la tensión de paso hasta 0 V y la tensión de toque se logra disminuir hasta en un 73%.

En las figuras 27, 28, 29, 30 y 31 se observa el comportamiento y la tendencia de los voltajes de toque y de paso cuando se instalan contrapesos en las patas de las torres.

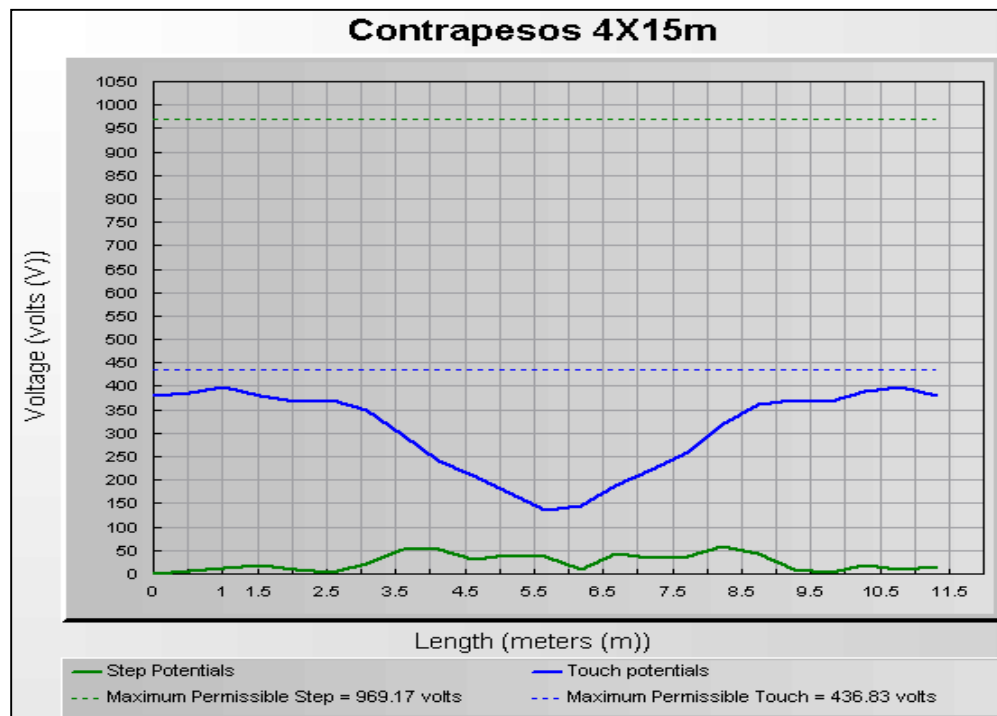


Figura 27. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X15m

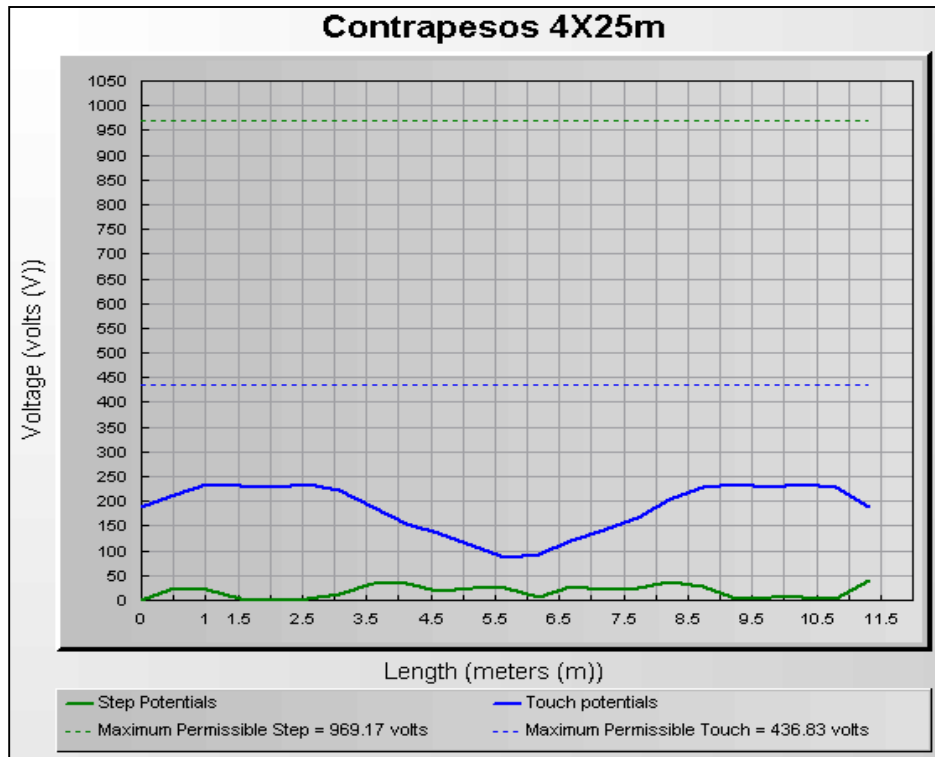


Figura 28. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X25m

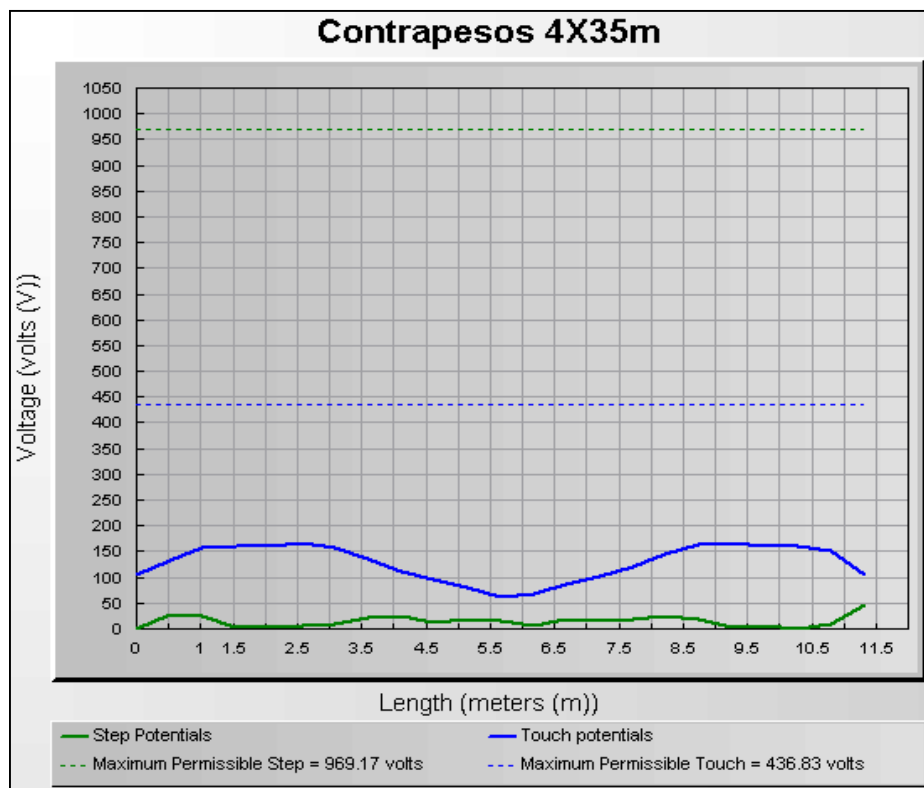


Figura 29. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X35m

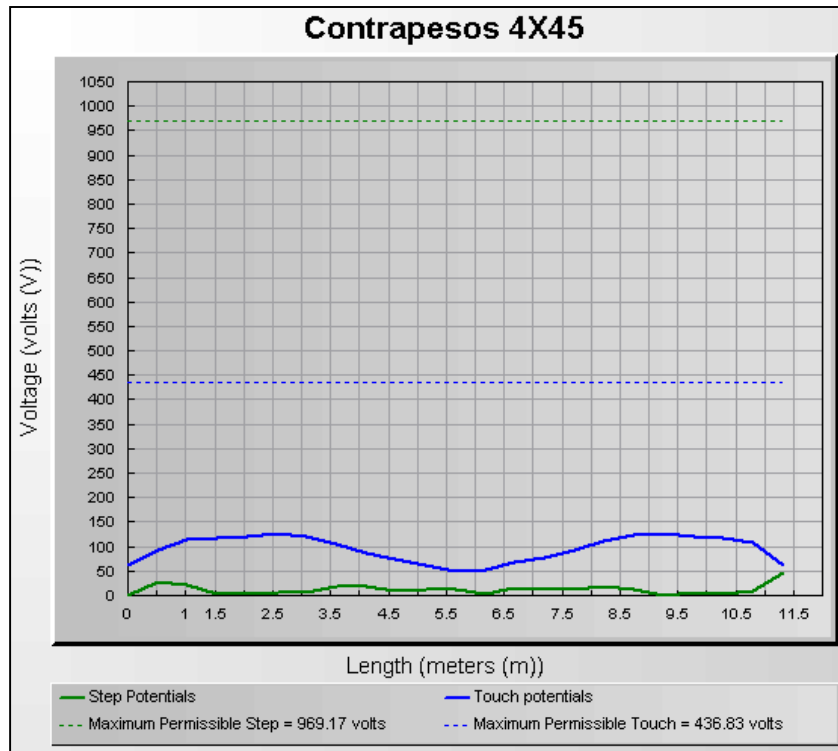


Figura 30. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X45m

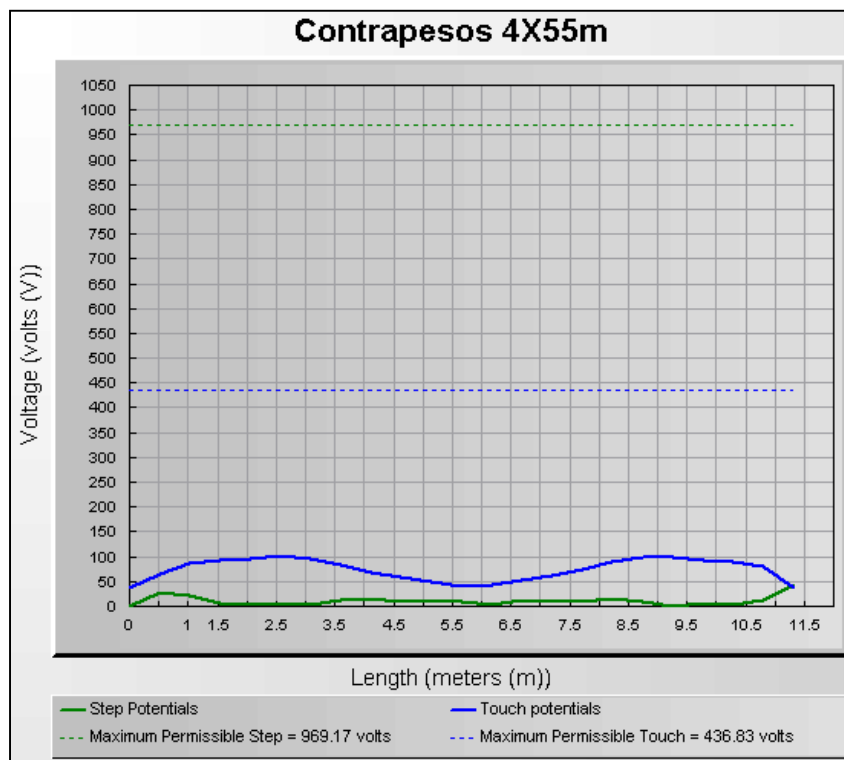


Figura 31. Perfiles Vt y Vp contrapesos 4X45m

A continuación se enuncian algunas recomendaciones que se deben tener al momento de instalar contrapesos:

- Se debe conservar una proporción mínima entre electrodo y contrapeso de 1:2
- Se recomienda construir varios contrapesos cortos más que uno largo, pero sin pasar de cinco.
- La longitud de los contrapesos debe estar entre 15 y 60 para mitigar los efectos de las ondas viajeras evitando que se generen reflexiones que puedan provocar flameos inversos y a su vez la salida de la línea.
- La medición de la resistencia de puesta a tierra debe hacerse con un telurómetro de 25 kHz o más con el fin de hacer la medida lo más precisa posible.

Caso D

Se fijaron contrapesos a cada una de las patas de la torre equipotencializados con la malla de puesta a tierra y la estructura como en el caso anterior, pero se cambió la disposición lineal del contrapeso (caso C) por una trayectoria mixta. Lo anterior con el fin de verificar si estos cambios influyen sobre la RPT y los voltajes de toque y de paso.

La trayectoria mixta consiste en instalar una fracción del cable de tierra (aprox 60%) formando un ángulo de 45° con el eje de la línea de transmisión, la otra fracción (aprox 40%) se instalará sobre una trayectoria que formará un ángulo de 135° con la disposición inicial y un ángulo de 90° con el eje de la línea.

En la Figura 32 se muestra el esquema de la malla de puesta a tierra probada en el caso D.

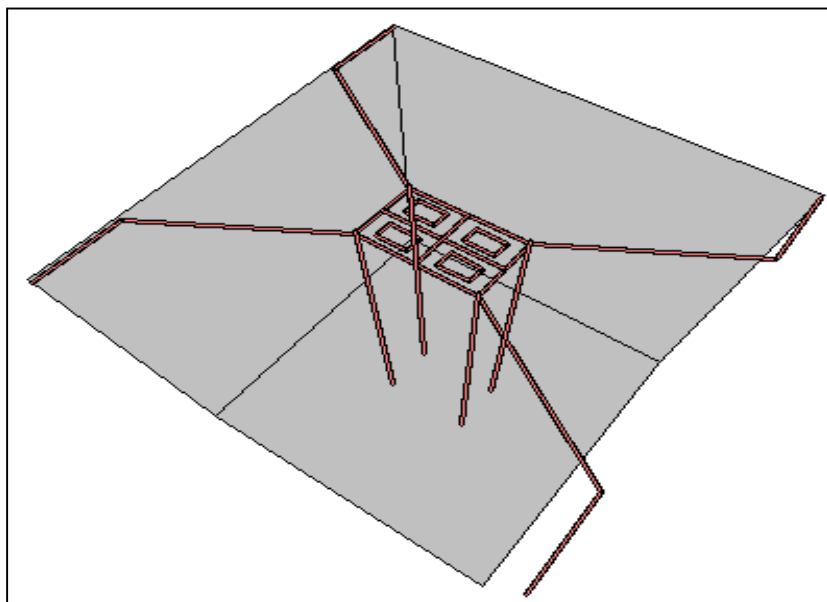


Figura 32. Malla de tierra con contrapesos mixtos

En la Tabla 11 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los parámetros al variar la longitud y forma de los contrapesos.

Longitud (m)	RPT (Ω)	Voltaje de paso (Voltios)	Voltaje de toque (Voltios)
15	14,99	38,66	433,85
25	10,77	19,08	267,14
35	8,62	7,42	183,04
45	7,21	2,40	135,30
55	6,21	1,70	106,36

Tabla 11. Resultados variación longitud y forma de los contrapesos

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que modificar la trayectoria de los contrapesos no es lo más indicado, debido a que en ocasiones los voltajes de toque y de paso se pueden ver alterados presentando algunos aumentos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que en ocasiones por temas constructivos y prediales se deben realizar variaciones en las trayectorias de instalación de los contrapesos, por lo tanto, no es extraño encontrar en campo este tipo de disposición.

Al comparar los resultados obtenidos en el caso D con los resultados del caso C, se puede evidenciar que la tensión de toque está aumentando en aproximadamente 15% y la tensión de paso presenta incrementos de hasta 6 veces.

En la Figura 33 y en la Figura 34 se muestra la comparación entre 2 situaciones del caso C y 2 situaciones del caso E, donde se mantiene la misma longitud pero se cambia la trayectoria de los contrapesos.

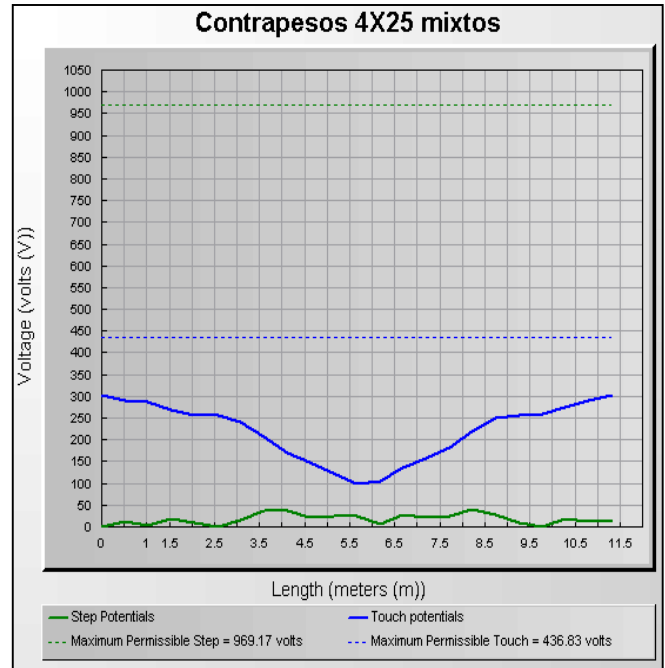
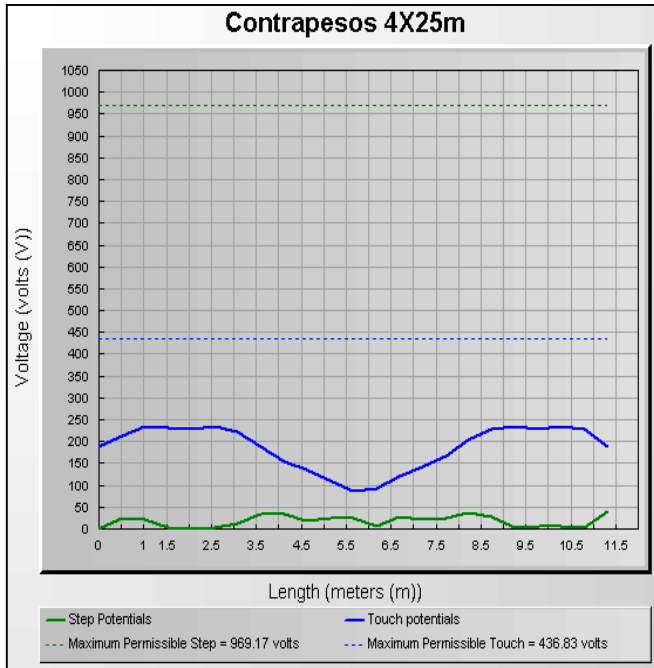


Figura 33. Perfiles comparativos Vt y Vp contrapesos de 25m

En la figura se observa que la magnitud de las tensiones de toque y de paso están disminuyendo para el caso C, incluso se observa que para el caso en que se mantiene la trayectoria lineal de los contrapesos las tensiones de toque en los extremos de la malla tienden a disminuir (se atenúan), mientras que para el caso en que se utilizaron contrapesos con trayectoria mixta las tensiones de toque a partir del centro de la torre comienzan a aumentar y aparentemente se mantiene la tendencia a medida que se aleja de la torre.

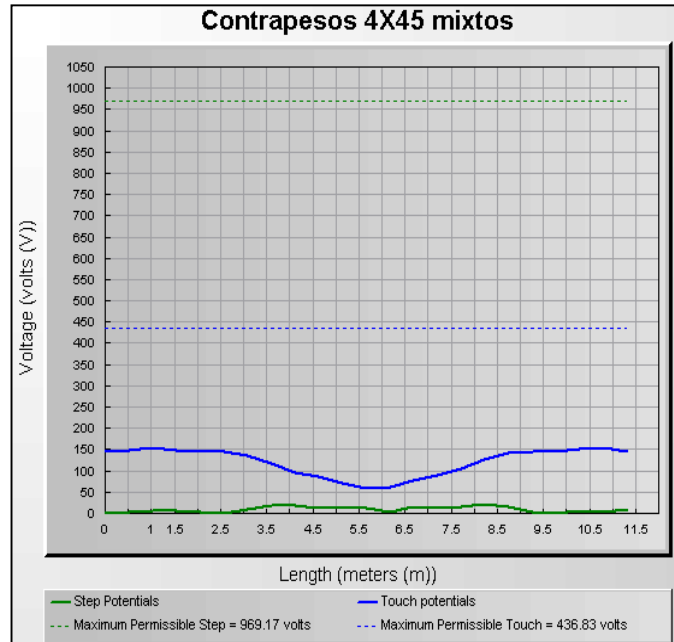
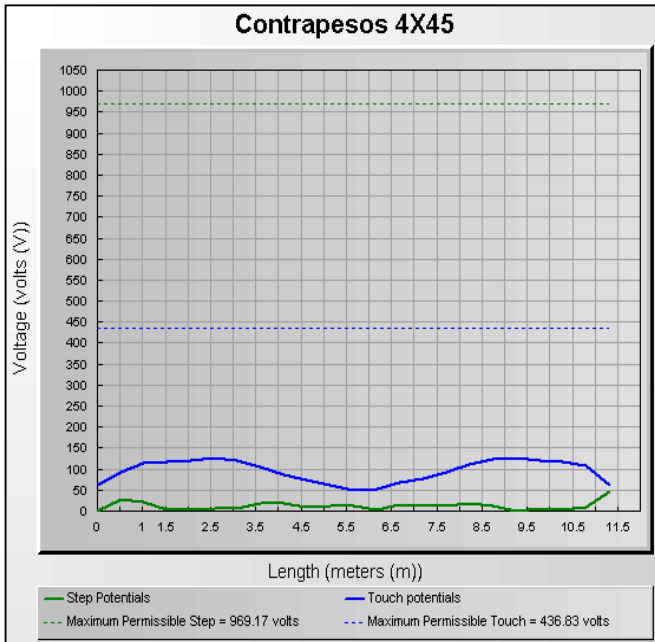


Figura 34. Perfiles comparativos Vt y Vp contrapesos de 45m

Igual que en la comparación anterior, se observa una disminución de la magnitud de las tensiones de toque y de paso para el caso en que se mantiene una trayectoria lineal de los contrapesos (Caso C) al compararlo con los valores obtenidos para la misma longitud en el caso D.

En las figuras 35, 36 y 37 se muestran los perfiles de las tensiones de toque y de paso para los casos analizados adicionalmente, donde se instalaron contrapesos de 15 m, 35 m y 55 m.

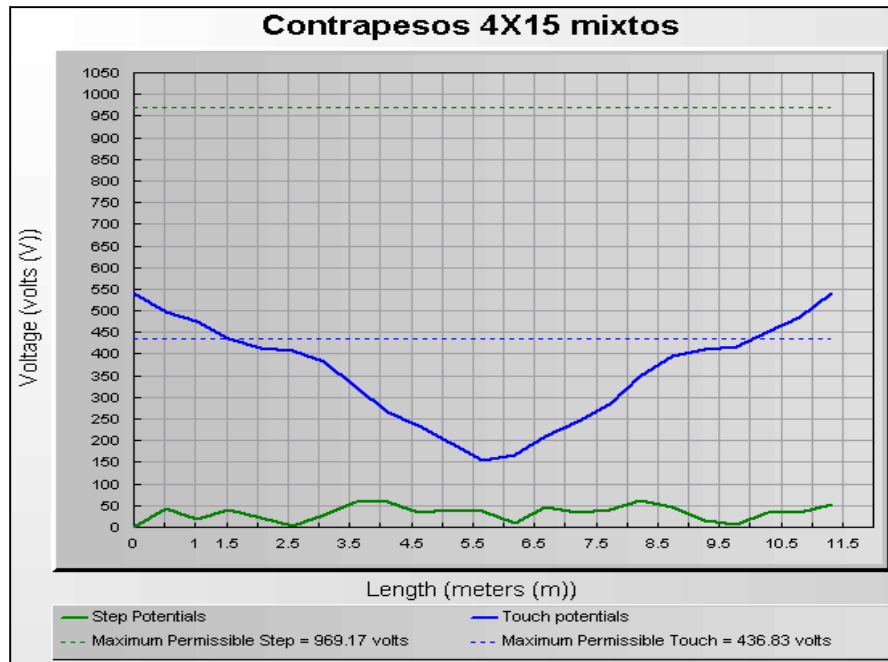


Figura 35. Perfiles Vt y Vp contrapesos 15m

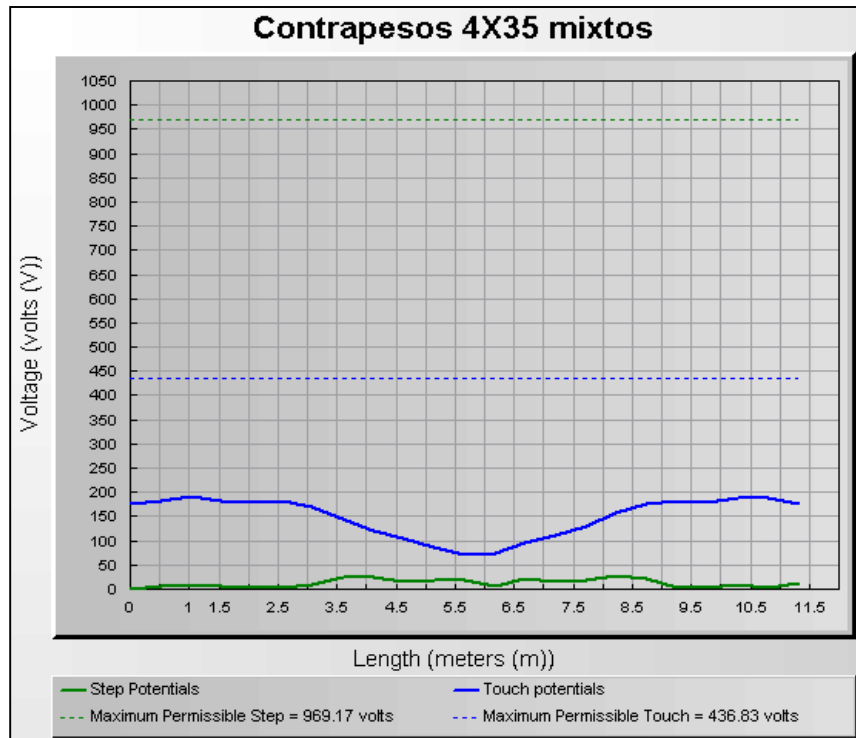


Figura 36. Perfiles Vt y Vp contrapesos 35m

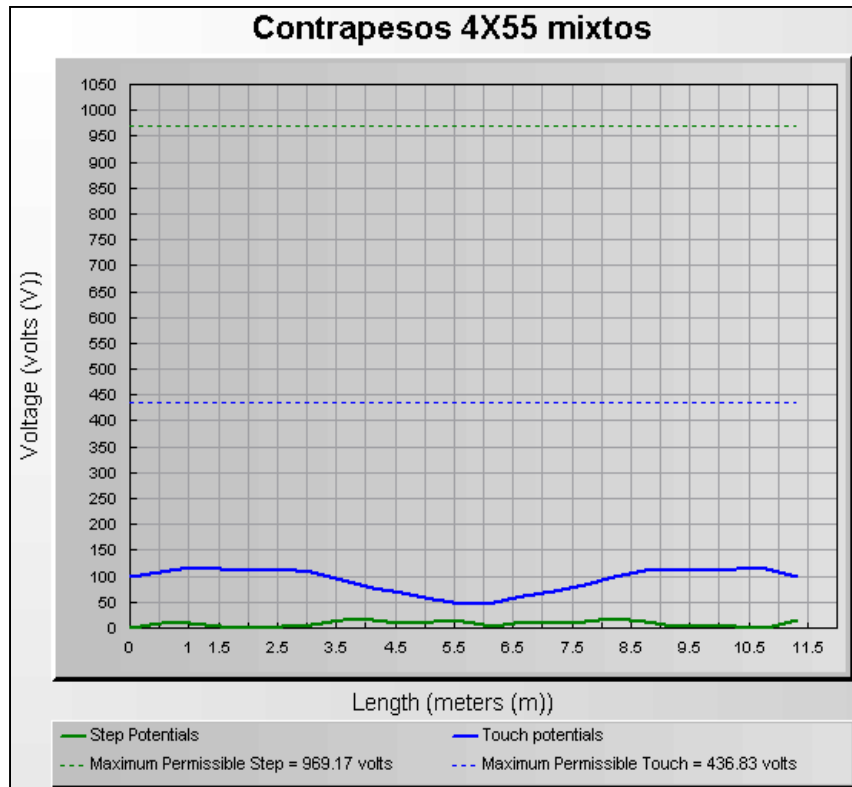


Figura 37. Perfiles Vt y Vp contrapesos 55m

En la siguiente tabla se puede evidenciar la variación de la RPT y las tensiones de toque y de paso, adicionalmente se muestra la desviación para cada uno de los casos.

Longitud contrapesos (m)	RPT Caso C (Ω)	RPT Caso D (Ω)	Tensión de paso Caso C (V)	Tensión de paso Caso D (V)	Tensión de toque Caso C (V)	Tensión de toque Caso D (V)	Desviación
15	14,48	14,99	18,55	38,66	376,33	433,85	15,28%
25	10,83	10,77	2,69	19,08	231,31	267,14	15,49%
35	8,68	8,62	2,4	7,42	162,19	183,04	12,86%
45	7,27	7,21	1,55	2,4	119,16	135,3	13,54%
55	6,26	6,21	0	1,7	98,91	106,36	7,53%

Tabla 12. Comparativo resultados RPT, Vt y Vp_Caso C y D

CASO E

Se realizó la sensibilidad en CymGrd variando el material del cable con el que se construye la malla de puesta a tierra y se encontró que no se genera ningún cambio sobre los valores de la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y de paso.

A continuación se muestran algunas de las ecuaciones que modelan de manera aproximada la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y paso (norma IEEE 80-2000).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad [8]$$

L_T : Longitud total de los cables enterrados

A : Área ocupada por la malla

H : Profundidad de enterramiento

ρ : Resistividad del terreno

En la ecuación de la RPT se puede observar que no hay dependencia del material del cable que se utiliza.

$$Ep_{50} = (1000 + 6C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad [8]$$

C_s : Factor de disminución de la capa superficial

ρ_s : Resistividad de la capa superficial

t_s : Duración de la falla

Igual que en el caso anterior solo se observa una dependencia de la tensión de paso de los parámetros duración de la falla, la resistividad del terreno y el factor de disminución de la capa superficial.

$$Et_{50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad [8]$$

C_s : Factor de disminución de la capa superficial

ρ_s : Resistividad de la capa superficial

t_s : Duración de la falla

Por último, en la ecuación de la tensión de toque también se observa que no hay dependencia del material del cable de tierra.

CONCLUSIONES ETAPA 2

Con relación al caso A donde se considera la variación del diámetro del cable de la malla de tierra se puede concluir que:

- El uso de cables de mayor diámetro para la malla de puesta a tierra es una opción que se debe evaluar minuciosamente, ya que en ocasiones el costo beneficio obtenido no termina siendo óptimo. Sin embargo, este método se puede considerar en torres particulares de la línea de transmisión, como por ejemplo sitios donde la instalación de las medidas de control es complicado (aislar la torre, instalar capas protectoras sobre el suelo, etc.), o en aquellas torres donde el riesgo de contacto accidental con la estructura bajo falla es mayor (cerca de viviendas, escuelas o cerca de las subestaciones).
- Para los casos donde la tensión de toque supere por el doble o más el límite permisible de dicha variable, el uso de este método no es lo más recomendado ya que las disminuciones obtenidas al aumentar el diámetro del cable son de aproximadamente del 7%, lo cual implicaría utilizar un cable con un diámetro muy superior para poder obtener valores que se encuentren dentro de los rangos de seguridad exigidos por la norma.
- El uso de cables de tierra con diámetros mayores a 15 mm termina siendo muy complejo, ya que son cables rígidos y pesados que dificultan el transporte y la manipulación en campo.

Para el caso B donde se considera la variación de la profundidad de enterramiento de la malla de tierra es posible concluir que:

- La ubicación de la malla de tierra a una profundidad de enterramiento menor a 0,75 m no genera reducción de los valores de la resistencia de puesta a tierra ni las tensiones de toque y de paso con relación a profundidades mayores, por el contrario, los valores obtenidos para dichas tensiones se ven alterados, presentándose variaciones fuertes en puntos adyacentes de la malla de tierra (distancias entre puntos 2 o 3 m). Lo anterior puede generarse debido a las interferencias que provoca la cercanía del cable de tierra con la superficie del terreno.

Adicionalmente el RETIE exige que los elementos del sistema de puesta a tierra se ubiquen a no menos de 0,75 m, para lograr un mejor comportamiento eléctrico del

sistema, evitar que se presenten accidentes con los seres vivos que se encuentran en contacto con la línea de transmisión y prevenir el vandalismo.

- De acuerdo con las simulaciones realizadas, soterrar la malla de tierra a 0,75 m es la mejor opción eléctrica y económica, ya que después de dicha profundidad la RPT y los voltajes de toque y de paso cambian la tendencia de disminución y comienzan a presentar aumentos. Adicionalmente aumentar la profundidad de enterramiento genera sobrecostos ya que se debe realizar excavaciones adicionales para todo el sistema.

Con respecto al caso C, donde se considera la instalación de contrapesos de diferente longitud equipotencializados con la malla de tierra, se concluye que:

- La instalación de contrapesos es sumamente efectiva, ya que permite disipar hasta el 80% de la corriente de corto circuito, debido a que mejora sustancialmente la resistencia de puesta a tierra y proporciona una mejor conexión eléctrica con el suelo, abarcando un área mayor del terreno.
- La instalación de contrapesos no implica un aumento considerable en los costos de construcción, ya que el cable normalmente utilizado es económico y su instalación solo comprende realizar excavaciones adicionales.

Adicionalmente y como se explicó anteriormente la recomendación es instalar varios contrapesos cortos (máximo 5) entre 15 y 60 m, con el fin de evitar reflexiones por las ondas viajeras y posibles flameos inversos y controlar las tensiones de toque y de paso en toda la torre.

Para el caso D, donde se considera la instalación de contrapesos mixtos es posible concluir que:

- El cambio de los contrapesos de una trayectoria lineal a una trayectoria mixta (ver Figura 33) no es lo más indicado para el sistema de puesta a tierra debido a que se generan aumentos en los valores de la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y paso, pudiendo superar incluso los límites permisibles. Sin embargo, cuando se requiera utilizar este método para no sobrepasar la faja de servidumbre de la línea o por cuestiones prediales, se deben analizar minuciosamente los resultados obtenidos y verificar que se encuentren dentro de los límites seguros estipulados por la normatividad.

Con relación al caso E donde se considera el cambio del material del cable con que se construye la malla de tierra es posible concluir que:

- La variación del material del cable de la malla de puesta a tierra no mejora los valores obtenidos para la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y de paso, lo anterior es posible verificarlo en las ecuaciones que modelan dichos parámetros, ya que ninguna de estas incluye la variable material.

En muchas ocasiones se cambia el tipo de material del cable de tierra para controlar propiedades del suelo como la acidez, la cual si presenta valores muy bajos ($\text{PH} < 4$) puede generar efectos corrosivos sobre los materiales, destruyendo el sistema de puesta a tierra y poniendo en peligro a las personas que están en contacto con las estructuras. Normalmente en suelos con pH's muy bajos se utiliza el cobre o CopperClad, el cual presenta mejor comportamiento ante la corrosión.

7.3 ETAPA 3 ANÁLISIS DE CASOS REALES EN CYMGRD Y COMPARACION CON LAS PRUEBAS EN CAMPO

Se analizaron algunos casos reales de la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II en el software CYMGRD con el fin de obtener los valores teóricos de la resistencia de puesta a tierra y los voltajes de toque y de paso. Después se comparó la información obtenida para dichos parámetros con los resultados obtenidos en campo para las mismas estructuras.

PROCEDIMIENTO EN CAMPO

7.3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE CADA UNA DE LAS TORRES

Fase 1

En una de las esquinas de cada una de las patas excavadas se instala una jabalina de acero galvanizado de 2,4 m, el extremo superior de dicho elemento queda aproximadamente a 2 m de la superficie del terreno. El objetivo primordial de realizar la instalación de la jabalina a esta profundidad es garantizar que el sistema de puesta a tierra esté en contacto con las 2 capas del suelo. A la misma jabalina se fija un tramo de cable de acero galvanizado 7/16" grado común por medio de una grapa bifilar y se lleva a una profundidad aproximada de 0,75 m de la superficie del terreno, luego en este punto se construye un anillo alrededor de cada pata de la torre de una longitud aproximada de 2 m.

Después de instalar el anillo equipotencial en cada pata y las jabalinas, se procede a colocar un anillo en cable de acero galvanizado 7/16" alrededor de toda la torre y se realiza una cuadrícula interna que une los lados opuestos cruzándose en el centro de la torre. En el anillo de cada una de las patas se deja un tramo de cable que servirá para interconectar ambos anillos, logrando que de esta manera toda la malla quede equipotencializada y se obtenga una mejor RPT.

A continuación se muestran algunas figuras donde se puede observar el proceso de instalación de la malla de puesta a tierra en todas sus etapas.

En la Figura 38 se muestra la instalación de la jabalina de puesta a tierra y su conexión a todo el sistema de puesta a tierra.

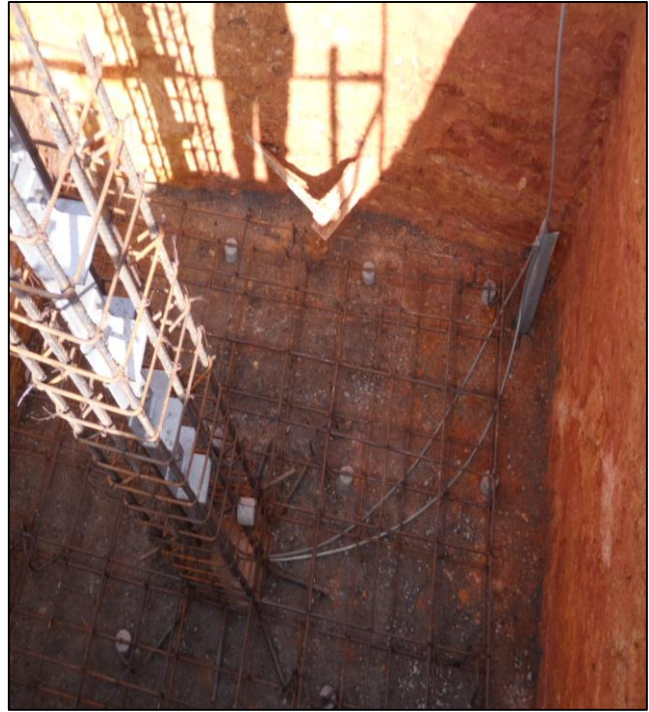


Figura 38. Instalación jabalina de puesta a tierra

En la Figura 39 se muestra la instalación del anillo de control en cada una de las patas de la torre, cabe anotar que es igual para ambas fundaciones parrilla y zapata.



Figura 39. Instalación anillo de control de tensiones en cada pata

En la Figura 40 se muestra la instalación del anillo de control de tensiones que cubre las 4 patas de la torre, dejando una distancia aproximada de 1m de la estructura.



Figura 40. Instalación y compactación del anillo de control exterior

Fase 2

La fase 2 de la construcción del sistema de puesta a tierra consiste en instalar contrapesos que permitan controlar la resistencia de puesta a tierra y a su vez las tensiones de toque y de paso. Los contrapesos se instalan dependiendo de la medida de puesta a tierra obtenida en campo y de este parámetro dependerán la cantidad y la longitud. Normalmente los

contrapesos son del mismo material de los anillos equipotenciales instalados en las patas y al exterior de la torre.

En la Figura 41 se muestra el proceso de instalación de los contrapesos, los cuales van conectados con la malla de puesta a tierra estándar que se construyó para cada una de las torres.



Figura 41. Instalación de contrapesos

7.3.2 MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN CADA UNO DE LOS SITIOS DE TORRE

Para medir la resistencia de puesta a tierra en cada uno de los sitios de torre se utilizó el método de caída de potencial, que consiste en pasar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C) y medir la tensión entre la puesta a tierra bajo prueba y un electrodo de potencial auxiliar (P). Para minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente, se coloca generalmente a una sustancial distancia del sistema de puesta a tierra. Típicamente esta distancia debe ser mínimo 6 veces superior a la dimensión más grande de la malla de tierra (lado de la malla).

El electrodo de potencial debe ser colocado en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también puede ser colocado en la dirección opuesta. En la práctica, la distancia "d" para el electrodo de potencial se elige aproximadamente al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta distancia está basada en la posición teóricamente correcta (61,8%) para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo de resistividad homogéneo.

La localización del electrodo de potencial es muy crítica para medir la resistencia de puesta a tierra. La localización debe ser libre de cualquier influencia del sistema de puesta a tierra bajo medida y del electrodo de corriente. Por lo tanto se deben obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de potencial en varios puntos entre la tierra y el electrodo de corriente.

En la Figura 42 se muestra la disposición física del método de la caída de potencial.

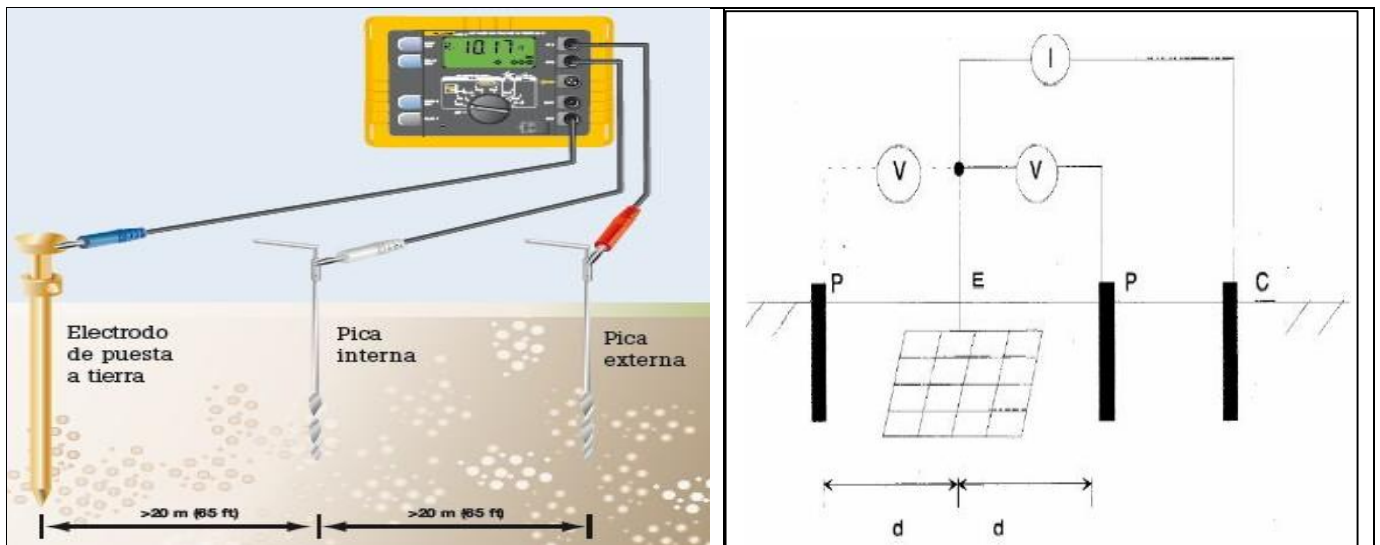


Figura 42. Método de la caída de potencial para medir la RPT

La resistencia de puesta a tierra debe ser medida antes de la puesta en funcionamiento de un sistema eléctrico, como parte de la rutina de mantenimiento o excepcionalmente como parte de la verificación de un sistema de puesta a tierra existente.

En las figuras que se muestran a continuación se observa el proceso para la medición de la resistencia de puesta a tierra.

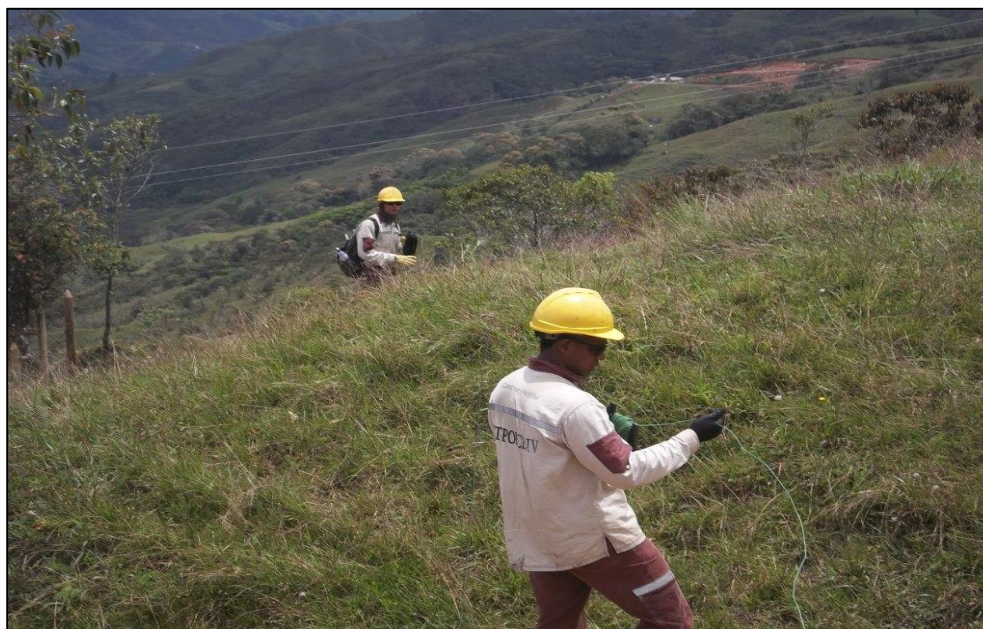


Figura 43. Ubicación del electrodo de potencial y de corriente

En la Figura 44 se observa como los oficiales riegan el cable para instalar los electrodos de potencial y corriente a las distancias especificadas en el procedimiento.



Figura 44. Ubicación del electrodo de tierra.

El electrodo de tierra se conecta a la estructura tal y como lo muestra la imagen, también es posible conectarlo a la malla de tierra si el cable se encuentra visible.



Figura 45. Disposición equipo de medida

Se dispone el equipo en un lugar cercano a la torre, se conectan los cables correspondientes a cada uno de los electrodos y se procede a medir la resistencia de puesta a tierra, normalmente se hace en 3 de las patas de la línea de transmisión y se promedian los resultados.



Figura 46. Resultados obtenidos

7.3.3 MEDIDA EN CAMPO DE LAS TENSIONES DE CONTACTO Y PASO

Para la medición de las tensiones de paso y contacto se utilizó el equipo MI 3295 el cual está compuesto por un equipo medidor (MI 3295M) que permite tomar los datos de en cada una de las pruebas, y por una estación (MI 3295S) la cual es la encargada de inyectar la corriente para llevar a cabo las pruebas.

El equipo tiene las siguientes características técnicas:

- Medida de resistencia de puesta a tierra con resolución de $1 \text{ m}\Omega$
- Medida de resistividad del terreno
- Corriente de prueba: 55 A Max.
- Voltaje de prueba: $< 55 \text{ V}$
- Frecuencia de prueba: 55 Hz

En la Figura 47 se muestra el equipo para medida de paso y contacto



Figura 47. Equipo MI 3295

PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Durante la medición se introduce en la tierra una corriente de prueba a través de una pica auxiliar. La resistencia de la pica auxiliar debe ser lo más baja posible para introducir una corriente de prueba elevada. La resistencia se puede reducir mediante el uso de varias picas en paralelo o de un sistema de tierra auxiliar como la pica auxiliar. Una corriente elevada mejora la inmunidad frente a las corrientes de tierra parásitas.

Tensión de paso

La medición se realiza entre dos (2) puntos en el terreno situados a una distancia de 1 m, tal como se muestra en la Figura 48. Las picas de medición de 25 kgf simulan los pies. La tensión entre las picas se mide por medio de voltímetro con una resistencia interna de 1 k Ω que simula la resistencia del cuerpo.

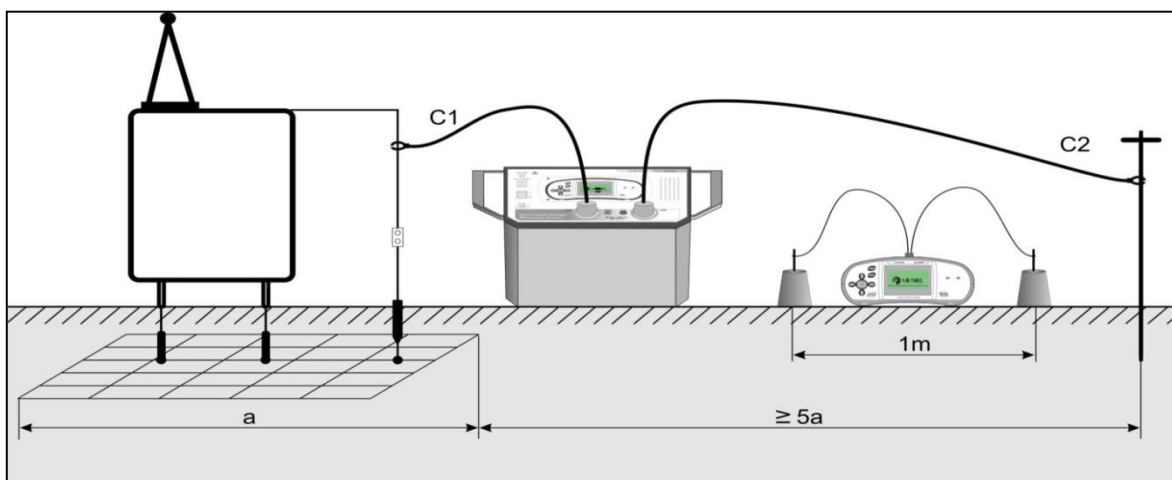


Figura 48. Montaje medida de la tensión de paso

Tensión de contacto

La medición se realiza entre una parte metálica accesible conectada a tierra y el terreno, tal como se muestra en Figura 49. La tensión entre las picas se mide por medio de voltímetro con una resistencia interna de 1 k Ω que simula la resistencia del cuerpo.

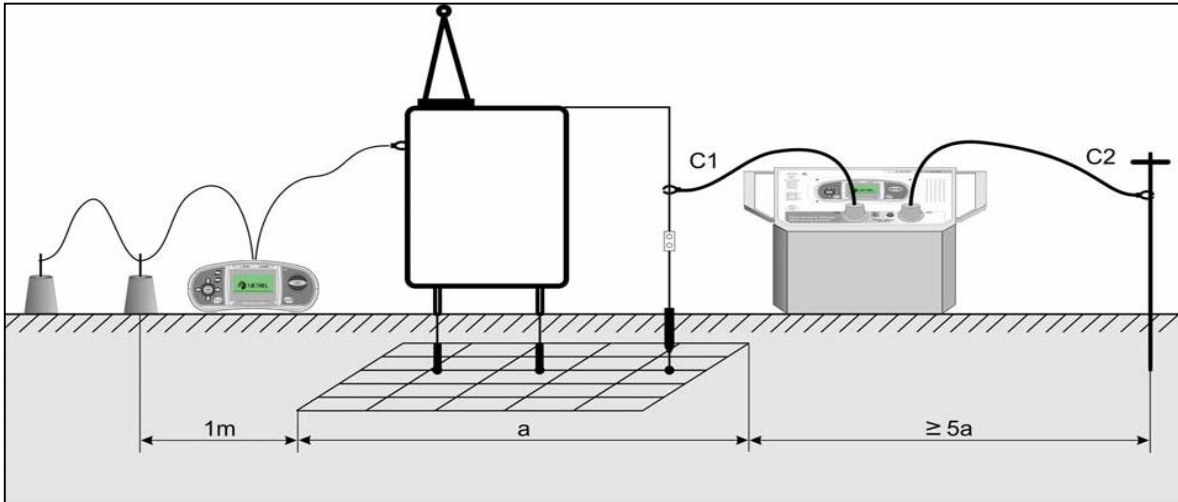


Figura 49. Montaje medida de la tensión de toque

Debido a que la corriente de prueba normalmente sólo es una pequeña parte de la mayor corriente de defecto, las tensiones medidas se deben ajustar a escala, suponiendo una proporcionalidad lineal, según la siguiente ecuación:

$$U_{S,C} = U_{Medida} \frac{I_{Defecto}}{I_{Gen}}$$

$U_{S,C}$: tensión escalonada o de defecto calculada en caso de corriente de defecto

U_{Medida} : tensión medida durante la prueba

$I_{Defecto}$: corriente de tierra máxima en caso de fallo

I_{Gen} : corriente de prueba introducida

En las siguientes figuras se muestra el proceso de medición de las tensiones de paso y contacto en campo.



Figura 50. Medición tensión de paso y contacto

En la Figura 51 se observa cómo debe ubicarse la persona para llevar a cabo la prueba de medición de la tensión de toque.



Figura 51. Posición para medida de la tensión de toque

En este caso los pies de la persona se ubican sobre las platinas metálicas que están interconectados con la estructura o electrodo de puesta a tierra, Adicionalmente la persona se encuentra aproximadamente a 1 m de la estructura, por lo tanto, en el momento en que el sujeto estire la mano hará contacto con la torre y será en ese instante donde estará sometido a una diferencia de potencial

La medida en campo se realizó de dos maneras: ubicando las platinas metálicas sobre la grama o capote y colocándolas directamente sobre la tierra (Se retiró la grama). Lo anterior con el fin de poder evidenciar el efecto que tiene el tipo suelo sobre la medida de las tensiones de toque y de paso.

Para el caso de la medida de la tensión de paso se utiliza un montaje muy similar con la diferencia que las platinas metálicas donde se ubica la persona no están conectadas al electrodo de puesta a tierra, pero sí deben estar separadas entre sí 1 m. Para este caso también se verificó la medida de las 2 maneras expuestas anteriormente.

En la Figura 52 se muestran las platinas metálicas dispuestas con una separación de 1m.



Figura 52. Medida tensión de paso

Para llevar a cabo la medición de las tensiones de toque y de paso era necesario instalar una tierra remota que permitiera la inyección de corriente al suelo de la zona donde se instaló la torre, al momento de realizar el ensayo se encontró que dicha tierra remota debería tener una RPT baja, porque si no el equipo no era capaz de inyectar un valor de corriente mínimo que permitiera realizar la prueba. Debido a esto fue necesario construir tierras remotas improvisadas, como por ejemplo varias varillas enterradas y puenteadas con un tramo de cable.

En otros casos fue posible conectarse a la malla de puesta a tierra de una torre de otra línea de transmisión o incluso a la malla de la subestacion para las medidas de las torres de llegada, lo que facilito enormemente la inyeccion de corriente y por consiguiente la efectividad de la prueba.

En la Figura 53 se muestran las tierras remotas que fue necesario utilizar para poder llevar a cabo la prueba.



Figura 53. Tierras remotas utilizadas para las pruebas

En la Figura 54 se muestran los valores medidos por cada uno de los equipos al efectuar las pruebas en un sitio de torre.



Figura 54. Resultados medida de tensiones y corrientes.

7.4 PROCEDIMIENTO TEÓRICO

Se modelaron en el software CymGrd 4 sitios de torre de la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II, para cada uno de los sitios se consideraron las características técnicas reales tales como la corriente de falla disipada a través de la malla de tierra, la resistividad del terreno y el modelo final del sistema de puesta a tierra (incluyendo contrapesos).

Para cada uno de los sitios se realizaron 2 análisis, en el primer análisis se considera como datos de entrada para la simulación la información obtenida en los diseños, para el segundo análisis se considera la información obtenida en campo con relación a la resistencia de puesta a tierra (RPT). Cabe anotar que en ambos casos el sistema de puesta a tierra simulado fue el instalado en obra, lo anterior debido a que se quieren asemejar los resultados de la mejor manera a la realidad.

Después de realizar las simulaciones, se compararán los resultados obtenidos con lo medido en campo.

En la Figura 55 se muestra el sistema estándar instalado en todos los sitios de torre de la línea de transmisión Rio Grande-Yarumal II.

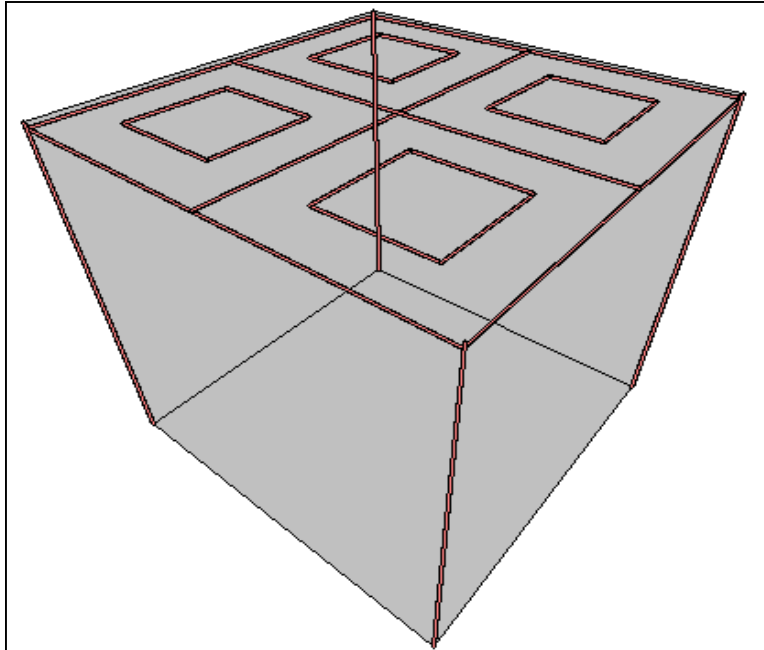


Figura 55. Malla de puesta tierra estándar

A continuación se muestra el análisis realizado para cada uno de los sitios elegidos.

7.4.1 ANÁLISIS TORRE No. 1 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II

Esta torre se encuentra ubicada dentro de la subestación Mocorongo en el municipio de Don Matías al norte del departamento de Antioquia, la morfología del sitio es entre ondulada y quebrada y afloran materiales del batolito antioqueño. El suelo posee una capacidad portante de 12,37 t/m² aproximadamente.

A continuación se especifica la información general del sitio de torre

- Corriente de cortocircuito: 1,40 kA
- Tensión de toque permisible: 436,86 V
- Tensión de paso permisible: 969,17 V
- RPT diseño: 27,14 Ω
- RPT medida: 1,0 Ω
- Resistencia del cuerpo humano: 1 k Ω
- Sistema de puesta a tierra estándar (sin contrapesos)
- La tensión de toque se midió a un metro del ángulo de espera de la pata de la estructura metálica, y la tensión de paso se midió dejando una separación entre las piernas de 1 m y sin estar en contacto con el electrodo de tierra (torre), tal y como lo indica el reglamento técnico RETIE.

Simulación con parámetros de diseño

Se realizó la simulación de la torre No. 1 considerando los datos de diseño, los resultados obtenidos son los que se muestran en la Tabla 13.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Diseño (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-001	447,5	1400	27,14	3880	848
	615,5				
	651,5				
	607,0				
	528,0				

Tabla 13. Parámetros eléctricos torre No. 1

En la Figura 56. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Diseño se muestra el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No. 1

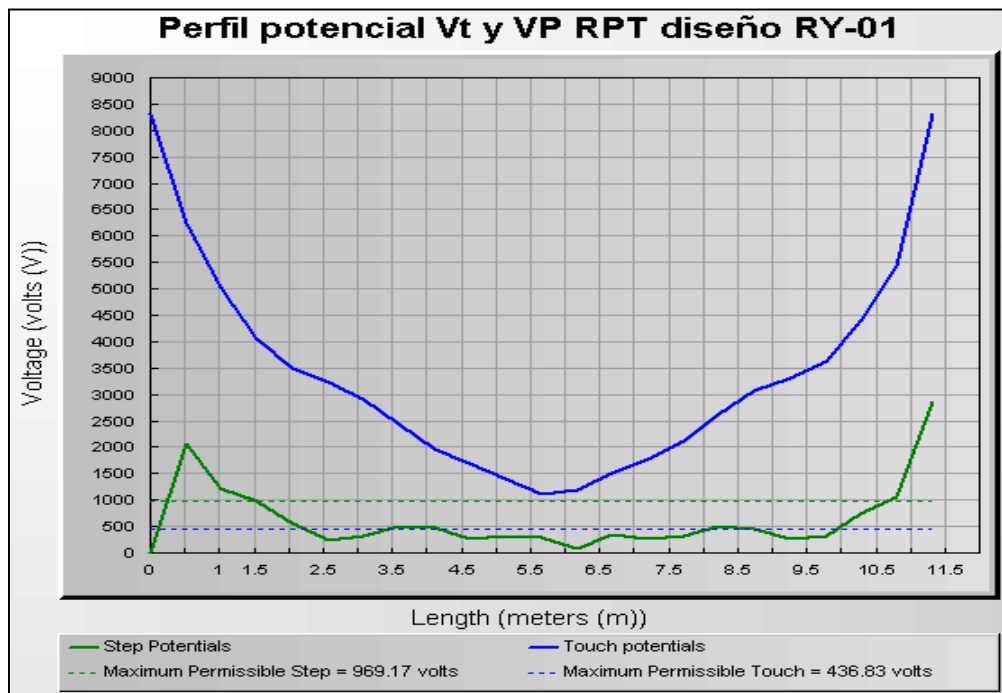


Figura 56. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Diseño

En la figura se observa que se está superando en todo el sistema de puesta a tierra el límite permisible para la tensión de toque (línea punteada azul), lo anterior debido a que se tiene una corriente de corto sumamente alta por la ubicación de la torre (entre mayor cercanía con la fuente, mayor el nivel de corriente de corto a través del sistema de puesta a tierra de la torre), además la resistencia de puesta a tierra que aunque no tiene un valor muy alto

está generando una oposición considerable al paso de la corriente, lo cual aumenta el nivel de la tensión de toque.

Con relación a la tensión de paso, a pesar que está presentando un valor alto (848 V punto de medida) no está sobrepasando el límite permisible (969,17 V, línea verde punteada).

Simulación con parámetros de campo

Luego de realizar la simulación del sistema de puesta a tierra de la torre con los parámetros de diseño, éstos se ajustaron a lo obtenido en campo (específicamente el valor de la resistencia de puesta a tierra) y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 14.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-001	447,5	1400	1,0	355	76
	615,5				
	651,5				
	607				
	528				

Tabla 14. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-01

De acuerdo con los datos obtenidos se muestra en la Figura 57 el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No.1.

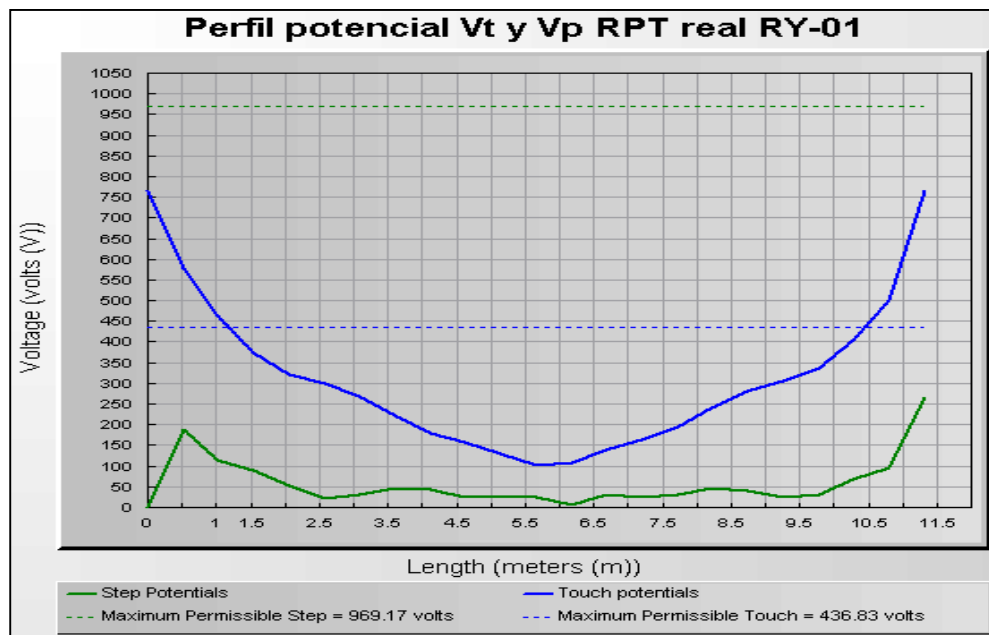


Figura 57. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Real

En la figura se observa claramente como disminuye la tensión de toque al modelar la malla con la resistencia de puesta a tierra real (1,0 Ω), hasta el punto que los valores obtenidos en las áreas de estudio (Peligro de contacto) están dentro de los límites permisibles. Lo anterior se debe principalmente a que la corriente de falla que se disipa por la torre puede ser drenada al suelo con una mínima oposición de la resistencia de puesta a tierra, evitando así que se presenten aumentos considerables en la tensión de toque.

Resultados de campo

De acuerdo con los procedimientos especificados en el numeral 5.3.3 (Medición V_t y V_p y RPT) se midieron en campo las tensiones de toque y de paso, y la resistencia de puesta a tierra obteniendo los siguientes resultados:

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-001	447,5	1400	1,0	0,3	0,0
	615,5				
	651,5				
	607,0				
	528,0				

Tabla 15. Resultados de campo torre No. 01

En la tabla que se muestra a continuación se comparan los resultados de las tensiones de toque y paso obtenidos en las 2 simulaciones explicadas anteriormente y lo medido en campo.

	Simulación con datos de diseño	Simulación con datos reales	Medida en campo
RPT (Ω)	27,14	1,0	1,0
Tensión de toque (V)	3880	355	0,3
Tensión de paso (V)	848	76	0,0

Tabla 16. Resultados obtenidos para los 3 casos de estudio

Es notable la diferencia obtenida en cada uno de los casos, la peor condición se tiene para la simulación con datos de diseño donde los valores obtenidos para las tensiones de toque y de paso superan los límites permisibles por el cuerpo humano. Los otros 2 casos ya se encuentran dentro de un rango de valores más bajo, incluso para el caso que prevalece que

es la medición en campo, pues es ésta la que indicará los valores reales a los que está sometido una persona al momento de una falla, se obtienen resultados que pueden considerarse despreciables.

Adicionalmente para este caso se decidió realizar una prueba de campo adicional, la cual consistía en censar las tensiones de toque y de paso bajo dos condiciones diferentes; colocando las platinas metálicas donde se ubica la persona sobre grama o capote y colocándolas sobre el suelo arenoso. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el capote funciona como una capa aislante la cual genera mayor caída de potencial y por lo tanto provoca una disminución en las tensiones de toque y paso.

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos para las 2 medidas.

	Medición sobre grama o capote	Medición sobre suelo arenoso
Tensión de toque (V)	0,1	0,3
Tensión de paso (V)	0,0	0,0

Tabla 17. Medidas Vt y Vp variación capa suelo

7.4.2 ANÁLISIS TORRE No. 23 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II

Esta torre se encuentra ubicada en el municipio de Santa Rosa al norte del departamento de Antioquia, la morfología del sitio es entre ondulada y quebrada y afloran materiales como suelo fino limoso con material granular. El suelo posee una capacidad portante de 9,4 t/m² aproximadamente.

A continuación se especifica la información general del sitio de torre

- Corriente de cortocircuito: 9,38 kA
- Tensión de toque permisible: 804,15 V
- Tensión de paso permisible: 2438 V
- RPT diseño: 51,5 Ω
- RPT medida: 16,63 Ω
- Resistencia del cuerpo humano: 1 k Ω
- Sistema de puesta a tierra estándar (sin contrapesos)
- La tensión de toque se midió a un metro del ángulo de espera de la pata de la estructura metálica y la de paso dejando una separación entre las piernas de 1m y sin estar en

contacto con el electrodo de tierra (torre), tal y como lo indica el reglamento técnico RETIE.

Simulación con parámetros de diseño

Se realizó la simulación de la torre No. 23 considerando los datos de diseño, los resultados obtenidos son los que se muestran en la Tabla 18.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Diseño (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-23	1400	938	51,5	8638	1229
	1510				
	1340				
	1300				
	1271				

Tabla 18. Parámetros eléctricos torre No. 23

En la Figura 58 se muestra el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No. 23.

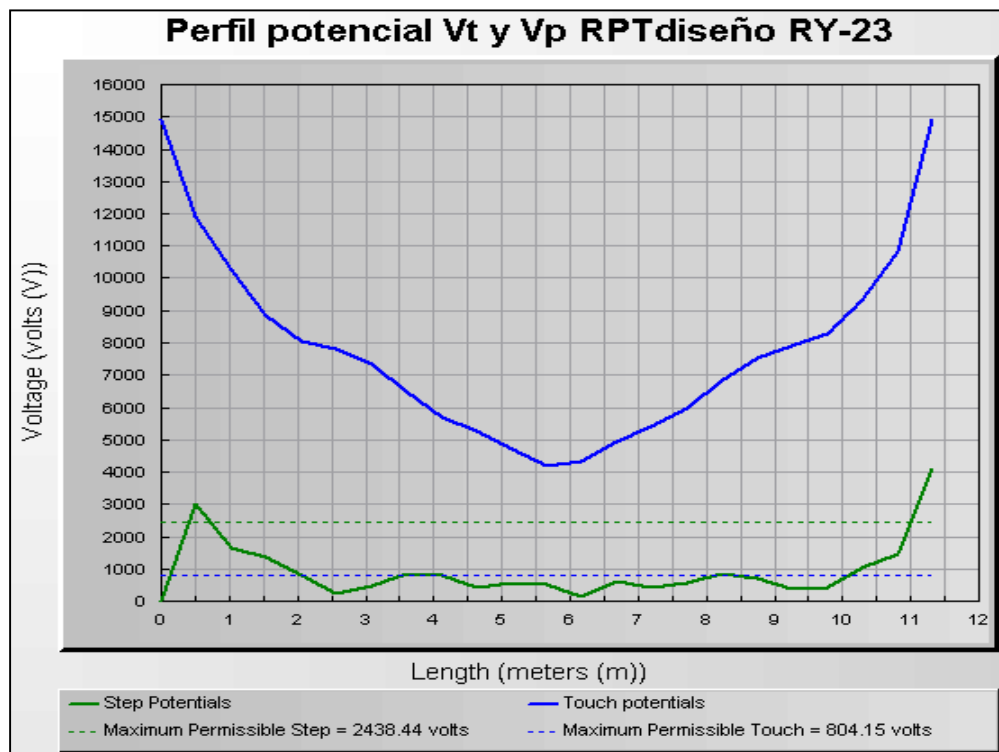


Figura 58. Perfil de tensiones RY-01 RPT_ Diseño

En la figura es claro los valores tan elevados que está presentando la tensión de toque, superando en toda el área de análisis el límite permisible, lo anterior se debe al alto nivel

de falla y a la resistencia de puesta a tierra que presenta un valor alto, los cuales juntos provocan un efecto poco recomendado en todo el sistema.

Simulación con parámetros de campo

Se ajustaron los parámetros de la simulación con los datos obtenidos en campo y se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 59.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-23	1400	938	16,63	2779	397
	1510				
	1340				
	1300				
	1271				

Figura 59. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-23

De acuerdo con los datos obtenidos se muestra en la Figura 60 el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No.1.

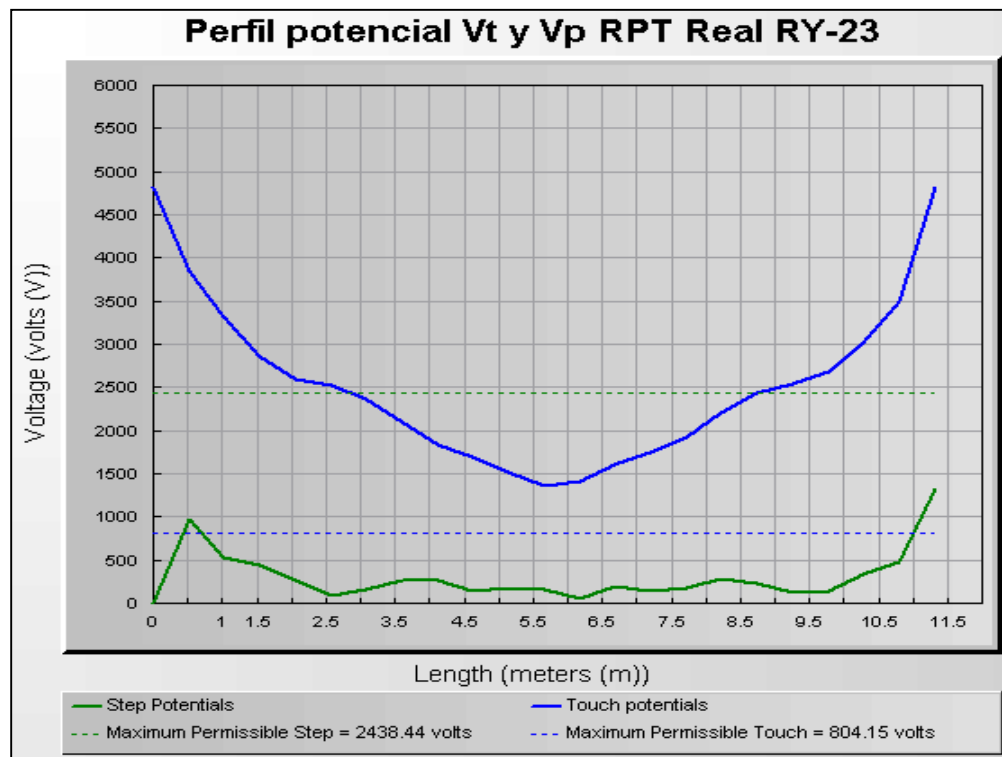


Figura 60. Perfil de tensiones RY-23 RPT_ Real

Con el cambio de la resistencia de puesta a tierra de diseño por la medida en campo no se obtuvo una mejoraría, la tensión de toque permanece sobre los límites permisibles ya que el nivel de cortocircuito es alto y la resistividad del terreno no ayuda a mejorar la disipación de las corrientes.

Para la tensión de paso en el caso anterior existía un área donde los valores obtenidos superaban el límite permisible, pero con el cambio de la RPT se logró mejorar esto y a lo largo de toda el área analizada no se está incumpliendo con lo permitido.

Resultados de campo

Después de medir en campo las tensiones de toque y de paso se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 19.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-23	1400	938	16,63	120	36
	1510				
	1340				
	1300				
	1271				

Tabla 19. Resultados de campo torre No. 23

En la tabla que se muestra a continuación se comparan los resultados de las tensiones de toque y paso obtenidos en las 2 simulaciones explicadas anteriormente y lo medido en campo.

	Simulación datos diseño	Simulación datos reales	Medida en campo
RPT (Ω)	27,14	16,63	16,63
Tensión de toque (V)	8638	2779	120
Tensión de paso (V)	1229	397	36

Tabla 20. Resultados obtenidos para los 3 casos de estudio

En la tabla se puede observar los resultados obtenidos en cada uno de los casos de estudio, las tensiones de toque obtenidas en las simulaciones están por encima de los valores permisibles por lo que aparentemente después de construir la torre con su respectiva malla de puesta a tierra no se cumplirá con lo exigido con la norma, pero por el contrario después

de realizar las pruebas en campo se obtuvieron valores que son perfectamente soportados por el cuerpo humano y están dentro de los límites estipulados por la norma.

El control de las tensiones de paso en las torres de una línea de transmisión se hace más sencillo debido a que el nivel de cortocircuito no afecta directamente su magnitud, y en caso de que supere los valores permisibles puede controlarse más fácilmente con anillos de control de potencial y contrapesos.

Para este sitio de torre también se realizó la medida de las tensiones de toque y de paso variando la capa superficial del suelo, con grama y sobre el suelo arenoso.

En la Tabla 21 se muestran los resultados obtenidos para las 2 medidas.

	Medición sobre grama o capote	Medición sobre suelo arenoso
Tensión de toque (V)	36,0	120
Tensión de paso (V)	7,6	16,5

Tabla 21. Medidas Vt y Vp variación capa suelo

Nuevamente se observa en los resultados obtenidos que el uso de suelos superficiales como grama o capote ayuda a disminuir la magnitud de las tensiones de toque y de paso.

7.4.3 ANÁLISIS TORRE No. 74 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II

Esta torre se encuentra ubicada en el municipio de Santa Rosa al norte del departamento de Antioquia, la morfología del sitio es entre ondulada y quebrada y afloran materiales como limo orgánico de alta compresibilidad con material granular en meteorización. El suelo posee una capacidad portante de 9,0 t/m² aproximadamente.

A continuación se especifica la información general del sitio de torre

- Corriente de cortocircuito: 0,306 kA
- Tensión de toque permisible: 539 V
- Tensión de paso permisible: 1379 V

- RPT diseño: 42 Ω
- RPT medida: 13,91 Ω
- Resistencia del cuerpo humano: 1 k Ω
- Sistema de puesta a tierra estándar (un contrapeso de 70 m)
- La tensión de toque se midió a un (1) metro del ángulo de espera de la pata de la estructura metálica, y la tensión de paso se midió dejando una separación entre las piernas de 1 m y sin estar en contacto con el electrodo de tierra (torre), tal y como lo indica el reglamento técnico RETIE.

En la Figura 61 se muestra la malla de puesta a tierra instalada en la torre No. 74.

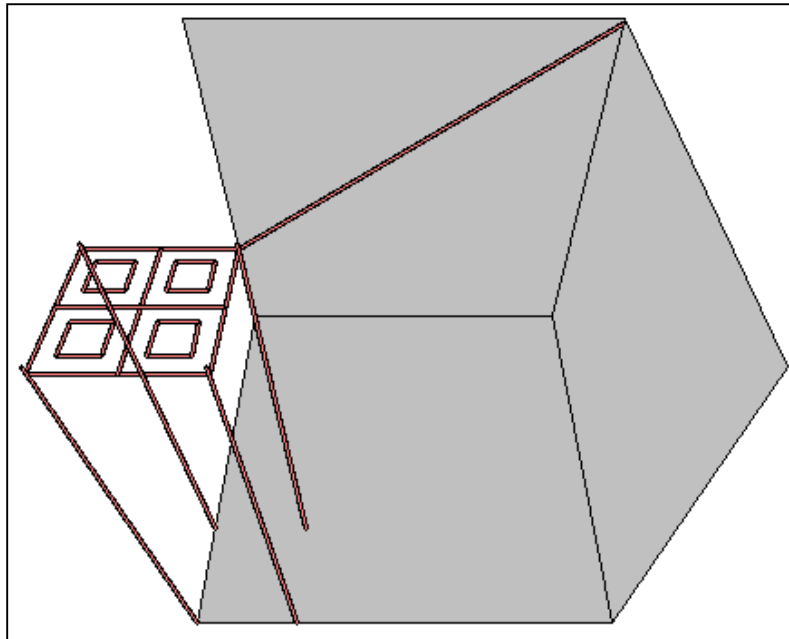


Figura 61. Malla de tierra torre No. 74

Simulación con parámetros de diseño

Se realizó la simulación de la torre No. 74 considerando los datos de diseño, los resultados obtenidos son los que se muestran en la Tabla 22.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Diseño (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-74	824	306	42	127	34
	1165				
	1475				
	1470				
	1480				

Tabla 22. Parámetros eléctricos torre No. 74

En la Figura 62 se muestra el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No. 74.

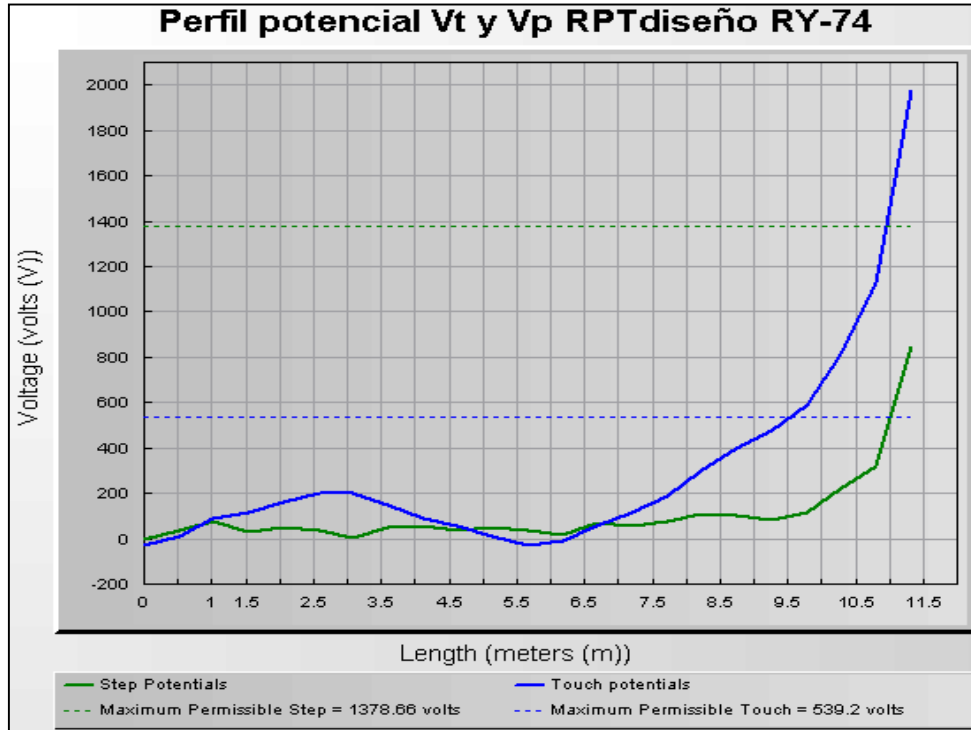


Figura 62. Perfil de tensiones RY-74 RPT_ Diseño

En la figura se observa una particular distribución del perfil de tensiones, la cual se debe al uso de contrapesos en la malla de puesta a tierra, los cuales permiten atenuar la curva de tensiones debido a la mejora de la resistencia de puesta a tierra que a su vez favorece la disipación de las corrientes de falla. Lo más relevante de los resultados obtenidos es que se puede evidenciar que la atenuación de la magnitud de las tensiones de toque y de paso se da únicamente en dirección del punto donde se ubicó el contrapeso, hacia la diagonal opuesta las tensiones de paso y toque toman valores superiores e incluso existe un área de la gráfica donde se superan los límites permisibles.

Teniendo en cuenta lo anterior es recomendable instalar contrapesos en cada una de las patas con el fin de obtener los buenos resultados mostrados en la figura anterior en las 4 patas extensiones de la torre y los puntos adyacentes. Por otro lado también es importante tener en cuenta que si se hace la instalación del contrapeso en una sola pata y por algún motivo en los otros puntos los valores de las tensiones están por fuera de los límites

permisibles se estaría exponiendo las personas que se encuentran en el área de influencia a situaciones peligrosas.

Simulación con parámetros de campo

Se ajustaron los parámetros de la simulación con los datos obtenidos en campo y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 23.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-74	824	306	13,91	45	12
	1165				
	1475				
	1470				
	1480				

Tabla 23. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-74

De acuerdo con los datos obtenidos se muestra en la Figura 63 el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No. 74.

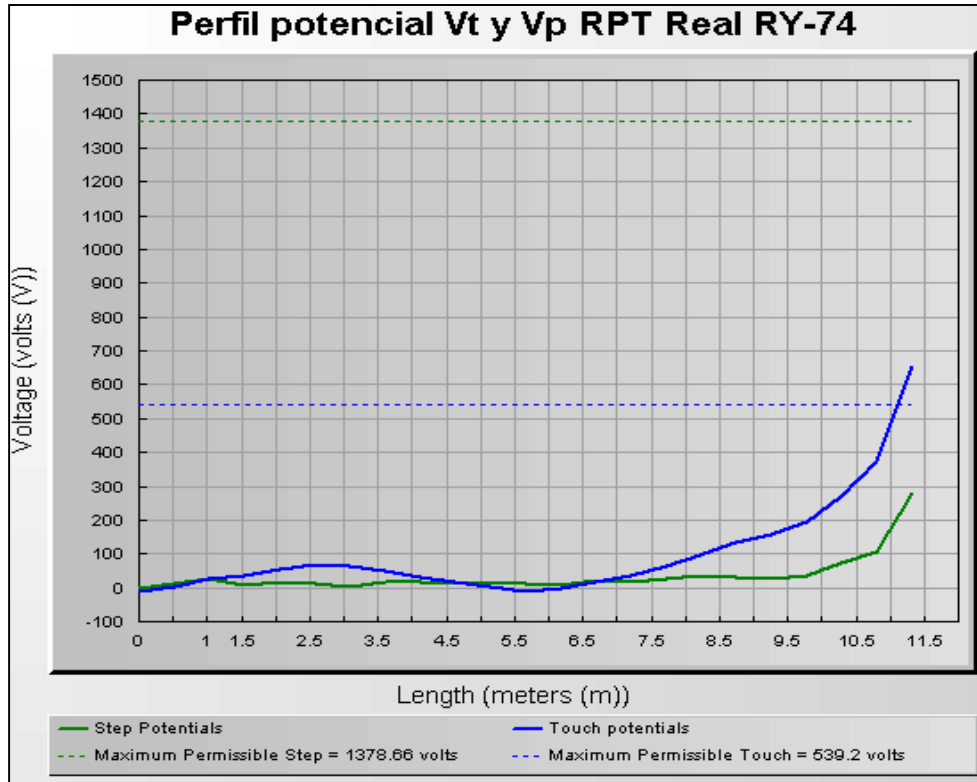


Figura 63. Perfil de tensiones RY-74 RPT_ Real

Con la disminución de la resistencia de puesta a tierra se genera reducción de la magnitud de las tensiones de toque y de paso a lo largo de toda la malla de tierra, pero permanece el comportamiento particular generado por el uso de los contrapesos.

Resultados de campo

Después de medir en campo las tensiones de toque y de paso se obtuvieron los siguientes resultados.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-74	824	306	13,91	8,3	0,8
	1165				
	1475				
	1470				
	1480				

Tabla 24. Resultados de campo torre No.74

En la tabla que se muestra a continuación se comparan los resultados de las tensiones de toque y paso obtenidos en las 2 simulaciones explicadas anteriormente y lo medido en campo.

	Simulación datos diseño	Simulación datos reales	Medida en campo
RPT (Ω)	42	13,91	13,01
Tensión de toque (V)	127	45	8,3
Tensión de paso (V)	34	12	0,8

Tabla 25. Resultados obtenidos para los 3 casos de estudio

En los resultados obtenidos se puede evidenciar que el nivel de falla influye fuertemente en la magnitud de las tensiones de toque y de paso, para este caso, en las 2 simulaciones y en la prueba de campo se están cumpliendo con los límites permisibles para ambos parámetros.

Para este sitio de torre también se realizó la medida de las tensiones de toque y de paso en sitios sobre capote y suelo granular. En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos para las 2 medidas.

	Medición sobre grama o capote	Medición sobre suelo arenoso
Tensión de toque (V)	36	120
Tensión de paso (V)	7,6	16,5

Tabla 26. Medidas Vt y Vp variación capa suelo

De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda reconfigurar los sitios de torre con grama de espesor mínimo de 5 cm, lo anterior con el fin de tener una capa de suelo adicional que genere un aislamiento mayor entre la malla de puesta a tierra y la persona en contacto o cerca de la torre, provocando que la diferencia de potencial entre la torre y la tierra sea lo menor posible.

7.4.4 ANÁLISIS TORRE No. 123 LÍNEA DE TRANSMISIÓN RIO GRANDE-YARUMAL II

Esta torre se encuentra ubicada en el municipio de Santa Rosa al norte del departamento de Antioquia, la morfología del sitio es entre ondulada y quebrada y afloran materiales como suelo fino limoso y arena fina limosa con material granular cuarzoso y pirita. El suelo posee una capacidad portante de 9,0 t/m² aproximadamente.

A continuación se especifica la información general del sitio de torre

- Corriente de cortocircuito: 0,780 kA
- Tensión de toque permisible: 947,3 V
- Tensión de paso permisible: 3011 V
- RPT diseño: 115,21 Ω
- RPT real: 17,14 Ω
- Resistencia del cuerpo humano: 1 k Ω
- Sistema de puesta a tierra estándar (Sin contrapesos)
- La tensión de toque se midió a un metro del ángulo de espera de la pata de la estructura metálica y la de paso dejando una separación entre las piernas de 1m y sin estar en contacto con el electrodo de tierra (torre), tal y como lo indica el reglamento técnico RETIE.

Simulación con parámetros de diseño

Se realizó la simulación de la torre No. 123 considerando los datos de diseño, los resultados obtenidos son los que se muestran en la Tabla 27.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla Icc (A)	RPT Diseño (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-74	1810	708	115,21	4400	962
	1840				
	2095				
	2230				
	2395				

Tabla 27. Parámetros eléctricos torre No. 123

En la Figura 64 se muestra el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No. 123.

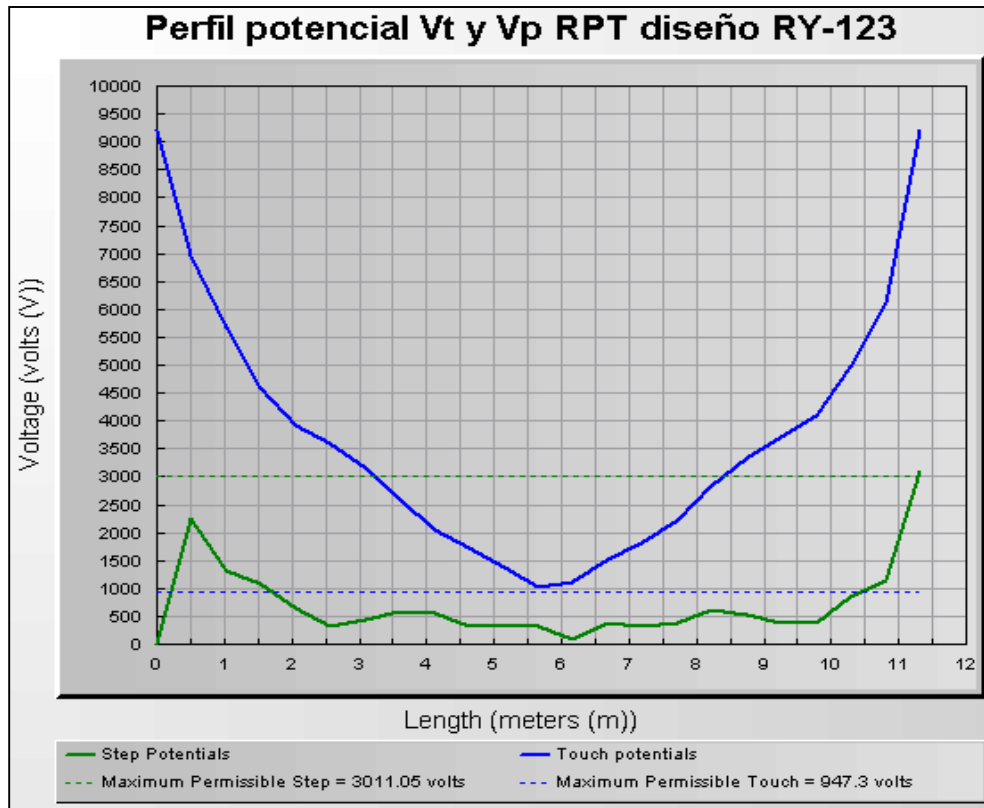


Figura 64. Perfil de tensiones RY-123 RPT_ Diseño

Para la simulación con los datos de diseño se está obteniendo un perfil para las tensiones de toque y de paso que supera los valores máximos permisibles, lo anterior se debe principalmente al valor la RPT obtenida en el diseño, ya que la oposición que esta presenta a la circulación de la corriente de falla es tal que dispara las tensiones de toque a lo largo de toda la malla.

Simulación con parámetros de campo

Se ajustaron los parámetros de la simulación con los datos obtenidos en campo y se obtuvieron lo resultados mostrados en la Tabla 28.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla I_{cc} (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-123	1810	708	17,14	652,92	138,3
	1840				
	2095				
	2230				
	2395				

Tabla 28. Parámetros técnicos RPT_ Real RY-123

De acuerdo con los datos obtenidos se muestra en la Figura 65 el perfil de las tensiones de toque y de paso para la torre No. 123.

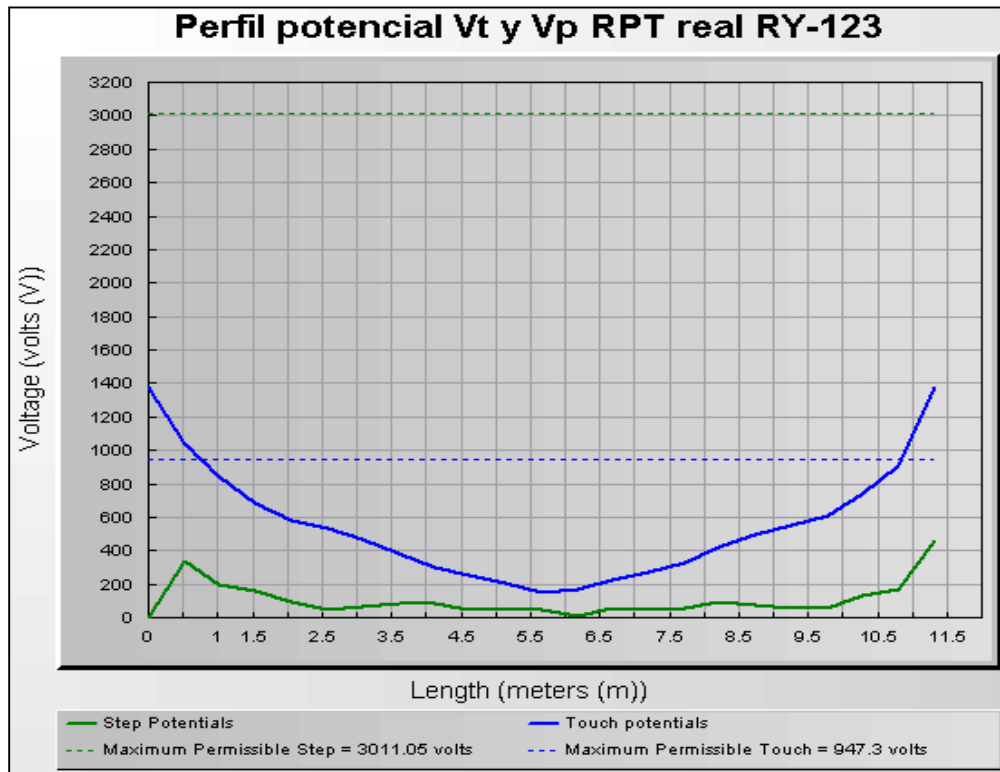


Figura 65. Perfil de tensiones RY-74 RPT_ Real

Con la disminución de la resistencia de puesta a tierra se genera reducción de la magnitud de las tensiones de toque y de paso a lo largo de toda la malla de tierra.

Resultados de campo

Después de medir en campo las tensiones de toque y de paso se obtuvieron los siguientes resultados.

Torre No.	Resistividad del terreno ρ (Ω -m)	Corriente de falla Icc (A)	RPT Real (Ω)	Tensión de toque (V)	Tensión de paso (V)
RY-123	1810	708	17,14	0,2	0
	1840				
	2095				
	2230				
	2395				

Tabla 29. Resultados de campo torre No. 123

En la tabla que se muestra a continuación se comparan los resultados de las tensiones de toque y paso obtenidos en las 2 simulaciones explicadas anteriormente y lo medido en campo.

	Simulación datos diseño	Simulación datos reales	Medida en campo
RPT (Ω)	115,21	17,14	17,14
Tensión de toque (V)	4400	652,92	0,2
Tensión de paso (V)	962	138,3	0,0

Tabla 30. Valores obtenidos para los 3 casos de estudio

En los resultados obtenidos se puede evidenciar los cambios notables que genera la variación de la RPT, adicionalmente, como en todos los casos las medidas de campo divergen totalmente de las simulaciones teóricas, lo cual en muchas ocasiones implica que se estén dimensionando los sistemas de puesta a tierra con características técnicas mayores a las necesarias.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En la ingeniería de detalle se debe realizar un análisis exhaustivo que permita la selección óptima del cable de guarda, donde sea posible identificar la influencia de cada uno de los cables probados sobre la corriente que se disipa por la torre y el sistema de puesta a tierra.

Utilizar un cable de guarda como el OPGW u otro con resistencia eléctrica similar no genera un sobre costo tan impactante como en muchas ocasiones se muestra; a la fecha (27/01/2016) 1 km de cable de acero galvanizado cuesta aproximadamente COP 2'310.000 y un km de cable OPGW está costando COP 7'000.000. En una línea de 50 km se habla de un sobre costo aproximado de COP 350'000.000 que corresponde a un 1,75% del valor total del proyecto (COP 20.000'000.000 aprox). Tal porcentaje se puede considerar despreciable si se tienen en cuenta los beneficios obtenidos; como la disminución de la corriente de falla que se disipa por la torre y el GPR, parámetros que impactan negativamente los voltajes de toque y de paso, los cuales son prioridad No. 1 (RETIE) para garantizar la seguridad de las personas y los seres vivos que están en contacto con la línea de transmisión.

- Después de realizar el análisis de sensibilidad donde se evaluó el comportamiento de las tensiones de toque y de paso y la resistencia de puesta a tierra al variar parámetros como el diámetro del cable de tierra, la profundidad de enterramiento de los contrapesos y la longitud, es posible realizar las siguientes recomendaciones
 - La variación del diámetro del cable de tierra para controlar las tensiones de toque y paso y la RPT no es una de las mejores opciones, ya que los beneficios obtenidos son mínimos y por el contrario se generan sobre costos en el material y se dificulta la instalación en campo debido a la difícil manipulación del cable. Es factible optar por esta opción para el caso donde el sitio de torre tenga una topografía tal que no permita la instalación de contrapesos.
 - Después de variar la profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra se pudo evidenciar que los resultados obtenidos no son los deseados, debido a que se produce una desestabilización de los parámetros de estudio. Al disminuir la profundidad de enterramiento por debajo de 0.75m las tensiones de toque y de paso comienzan a presentar cambios altos en puntos adyacentes de la malla de tierra (1 o 2m), para el caso donde se aumenta la profundidad de enterramiento aproximadamente a 1 m de longitud las tensiones de toque y paso y la RPT cambian su tendencia de disminución y comienzan a aumentar.

Teniendo en cuenta lo anterior se recomienda utilizar la profundidad de enterramiento estipulada en el RETIE (0.75m), la cual es segura debido a que es poco probable que se desentierre y además en este punto el comportamiento del sistema de puesta a tierra es el más óptimo.

- Como método más óptimo y eficiente se recomienda el uso de contrapesos interconectados con el sistema de puesta a tierra ya que permiten disipar hasta el 80% de la corriente de corto circuito.

Las consideraciones más importantes que se deben tener en cuenta al momento de instalar estos elementos son: instalar varios contrapesos cortos (máximo 5 contrapesos) en vez de uno largo, lo anterior debido a que un solo electrodo me ayudará a controlar las tensiones de toque y de paso sobre el área que está dispuesto, quedando descubierto el resto de la torre.

Adicionalmente los contrapesos deben tener una longitud entre 15 y 60m para mitigar el efecto de las ondas viajeras, las cuales pueden generar reflexiones y posibles flameos que impliquen la salida de la línea de transmisión.

Hasta donde sea posible los contrapesos se deben instalar con un ángulo de 45° y manteniendo una trayectoria lineal, lo anterior debido a que dicho ángulo permite generar una simetría en el terreno cubriendo la mayor área posible. Con relación a la trayectoria lineal se pudo comprobar que generar cambios de dirección en el contrapeso puede provocar aumentos de las tensiones de toque y de paso.

Por último se debe garantizar una excelente conexión eléctrica con el terreno, considerando la profundidad de enterramiento, el suelo y la compactación.

- Se recomienda instalar una jabalina de puesta a tierra en cada una de las patas de la torre la cual deberá estar interconectada con la malla de tierra, adicionalmente se debe garantizar que la profundidad a la cual se entierre el electrodo permita el contacto de este con las 2 capas del suelo. Lo anterior debido a que el contacto con los 2 tipos de suelo permitirá una mejor disipación de la corriente de corto y por ende se disminuirán las tensiones de toque y de paso.
- El análisis de sensibilidad realizado y los resultados obtenidos permitieron ratificar que el uso de los anillos de control de potencial como parte del modelo del sistema de puesta a tierra son una alternativa eficiente, ya que permiten disminuir sustancialmente la diferencia de potencial entre la torre y el suelo para el caso de la tensión de toque y la diferencia de potencial entre 2 puntos del suelo (1m) para el

caso de la tensión de paso. Es muy importante tener en cuenta que el éxito de los anillos de control dependerá de su ubicación. Se recomienda como sitio ideal la instalación alrededor de cada una de las patas (1m de la torre) y alrededor de toda la torre. También se debe considerar una cruz interna que una los lados opuestos de la malla exterior de la torre para el caso en que el ser vivo pueda estar ubicado en esta zona.

- Se pudo evidenciar en las pruebas de campo que la medida obtenida de las tensiones de toque y de paso varía cuando la persona se ubica sobre la grama o capote o cuando se ubica sobre el suelo granular directamente. Por lo tanto se recomienda realizar siempre la reconformación morfológica del sitio de torre después de finalizar la compactación de la obra civil.
- Si al momento de realizar la ingeniería de detalle se obtiene un diseño del sistema de puesta a tierra robusto y con unas condiciones fuera de lo normal, se recomienda realizar una prueba de campo al inicio de la construcción, en la cual se instale el sistema estándar propuesto, para así verificar si este está cumpliendo con los límites permisibles establecidos para las tensiones de toque y de paso y la RPT. En caso tal de que el sistema funciona correctamente se ajustara el diseño y los resultados obtenidos en campo serán suficientes como sustento.
- Después de realizar todas las simulaciones, análisis de sensibilidad, pruebas comparativas y pruebas de campo consideradas dentro del alcance del proyecto de grado, es posible recomendar el uso del sistema de puesta a tierra propuesto para líneas de transmisión a 110 kV, debido a que se encuentra técnica y económicamente viable. Adicionalmente presenta una facilidad constructiva que permitirá mejorar los tiempos de ejecución.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adegboyega, Gabriel A. «Assessment of Soil Resistivity on Grounding of Electrical systems.» Akure, Nigeria, 2011.
- [10] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. «Medida de Resistencia de Puesta a Tierra.» Medellín, 2008.
- [2] Roboam, Xabier. *Systemic Design Methodologies for Electrical Energy Systems*. Copyright, 2013.
- [3] Dawalibi, F.P. «Behaviour of grounding systems in multilayer soils: a parametric analysis.» *Power Delivery, IEEE Transactions*, 1994: 342.
- [4] González, Andres Paniagua. «Estudio general de puesta a tierra en subestaciones electricas.» Madrid, 2010.
- [5] Roy B Carpenter, Jr. *Designing For A Low Resistance Earth interface*. USA: LECglobal, 2007.
- [6] Seedher, Hans R. «Estimation of two layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions.» *Power Delivery, IEEE Transactions*, 1992: 1217.
- [7] Dawalibi, F. *Power frequency performance of transmission line structure grounds*. Copyright, 1984.
- [8] Miembros IEEE. *IEEE std 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York: Copyright, 2000.
- [9] Miembros IEEE. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth surface potentials of a Grounding System*. New York: Copyright, 2012.
- [10] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. «Medida de Resistencia de Puesta a Tierra.» Medellín, 2008.