



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

Alta Tensión 2015 - A

	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO		
	FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.		
Año de la Diversificación Productiva y del Fortalecimiento de la Educación			
CURSO	ALTA TENSIÓN		
TEMA	DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA		
PROFESOR	ING. RAMOS TORRES ERNESTO		
ALUMNO	FLORES ALVAREZ ALEJANDRO	CÓDIGO	1023120103
FECHAS:			
ELABORACIÓN	Sábado 25 de Abril al 11 de Mayo		
ENTREGA	Jueves 14 de Mayo		
REVISIÓN	Emitido para revisión y aprobación		
2 TRABAJO DOMICILIARIO 2015 – A DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA		Documento No.: ALTA-TENSION-2015A-002-004	



DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA 2 TRABAJO DOMICILIARIO Contenido

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Objeto
- 1.2 Alcances
- 1.3 Normas Aplicables

2. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

- 2.1 Realización de la Medición
- 2.2 Método de Medición de la Resistividad Eléctrica del Terreno
- 2.3 Método Wenner
- 2.4 Consideraciones tomadas en la realización de la medición
- 2.5 Equipos de Medición Utilizados
- 2.6 Análisis y procesamiento de las mediciones
 - 2.6.1 Factores que influyen en la Resistividad Eléctrica del Terreno
 - 2.6.2 Comportamiento Eléctrico del Suelo
 - 2.6.3 Unidades de Medidas y Rangos de la Conducción Eléctrica del Suelo
 - 2.6.4 Análisis de la Información
 - 2.6.5 Estratificación del Suelo
 - 2.6.6 Modelamiento del Suelo de dos Estratos
 - 2.6.7 Metodología para la Estratificación del Terreno
 - 2.6.8 Resultados de la Estratificación del Terreno
 - 2.6.9 Conclusiones del Estudio de Resistividad del Terreno

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

- 3.1 Funciones de la puesta a tierra
- 3.2 Procedimiento de cálculo
- 3.3 Diseño de la malla de puesta a tierra
 - 3.3.1 Resistividad del terreno
 - 3.3.2 Determinación de la contribución de la corriente en la malla de tierra profunda y determinación de la relación X/R



- 3.3.3 Determinación de la sección mínima del cable de la malla de puesta a tierra
- 3.3.4 Datos de evaluación de las mallas
- 3.3.5 Tensiones máximas admisibles de toque y de paso
- 3.3.6 Tensiones de toque y de paso durante una falla
- 3.3.7 Perfiles de potencial
- 3.3.8 Superficies de tensión de CONTACTO
- 3.3.9 Tensión de superficie

4. CONCLUSIONES

5. BIBLIOGRAFIA

- 5.1 Libros y Normas Internacionales
- 5.2 Páginas Web, Referencias Virtuales, Tutoriales

6. ANEXOS

Contenido de Cuadros

- Cuadro N°: 1 Resumen de Medición de Resistividad del Terreno
- Cuadro N°: 2 Resistividad de diseño
- Cuadro N°: 3 Dimensionamiento del Conductor y la Varilla

Contenido de Cuadros

- Figura N° 1 Mediciones de Resistividad
- Figura N° 2 Modelo de Estratificación de Estratos Horizontales
- Figura N° 3 Resultados de Estratificación del Terreno
- Figura N° 4 Determinación de la Relación X/R Barra en 60 kV
- Figura N° 5 Malla de Tierra Profunda –Vista en Planta 2D
- Figura N° 6 Malla de Tierra Profunda –Vista Isométrica 3D
- Figura N° 7 Diagonal analizada para Perfiles de Potencial – Caso 1
- Figura N° 8 Perfil de Potenciales de Superficie – Caso 1
- Figura N° 9 Perfil de Potenciales de Paso – Caso 1
- Figura N° 10 Perfil de Potenciales de Contacto (Toque) – Caso 1
- Figura N° 11 Diagonal analizada para Perfiles de Potencial – Caso 2
- Figura N° 12 Perfil de Potenciales de Superficie – Caso 2
- Figura N° 13 Perfil de Potenciales de Paso – Caso 2



Figura N° 14 Perfil de Potenciales de Contacto (Toque) – Caso 2

Figura N° 15 Diagonal analizada para Perfiles de Potencial – Caso 3

Figura N° 16 Perfil de Potenciales de Superficie – Caso 3

Figura N° 17 Perfil de Potenciales de Paso – Caso 2

Figura N° 18 Perfil de Potenciales de Contacto (Toque) – Caso 2

Figura N° 19 Superficie de Tensión de Contacto (Toque)-Planta

Figura N° 20 Superficie de Tensión de Contacto (Toque)-Zoom de Esquinas 1 y 2

Figura N° 21 Superficie de Tensión de Contacto (Toque)-3D

Figura N° 22 Tensión de Superficie – Planta

Figura N° 23 Tensión de Superficie – 3D



DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA 2 TRABAJO DOMICILIARIO

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto

El desarrollo de este trabajo domiciliario tiene como objetivo, definir y validar las características del sistema de puesta a tierra para una Subestación en 60 kV; y analizar los resultados finales con el programa CYMGrd 6.3.

1.2 Alcances

El alcance del presente informe comprende:

- Desarrollo de la memoria de cálculo
- Anexos de los cálculos

1.3 Normas Aplicables

Para el diseño de de la red de tierra se ha utilizado la Norma IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding; y la Norma ANSI/IEEE Std.81 - 1983 "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System".

Adicionalmente se ha hecho uso del programa CYMGrd para realizar los cálculos de malla, que también se basa en la norma IEEE Std 80-2000.

2. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

2.1 Realización de la Medición

Para el problema vamos a considerar mediciones efectuadas a una SE al mismo nivel de altitud 3800 m.s.n.m. y considerando también que la región sea cercana a la SE de Corongo, realizando mi investigación obtuve datos de medición de la resistividad para la **SE Corongo**, con estos datos que más adelante mencionare diseñare mi malla de puesta a Tierra, las mediciones de resistividad del suelo se realizan en el sentido longitudinal y transversal, en el área donde se desea instalar la malla de tierra profunda.

2.2 Método de Medición de la Resistividad Eléctrica del Terreno

Para la medición de la resistividad eléctrica del terreno, se ha utilizado el Método de "Wenner"; el cual es una simplificación del método de los cuatro puntos.

2.3 Método Wenner

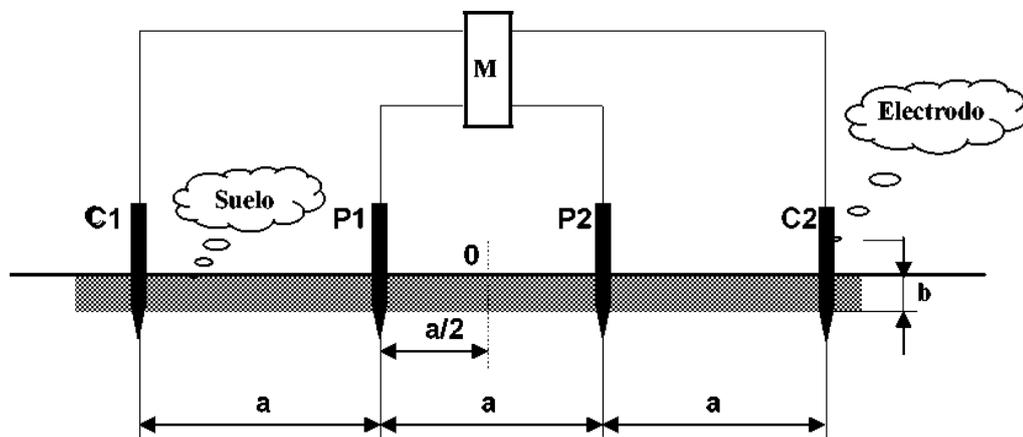
Este método de medición es un caso particular del método de los cuatros electrodos, los cuales son dispuestos en línea recta e igualmente espaciados, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad eléctrica del terreno, no siendo necesario que la profundidad de los electrodos, sobrepase los 30 cm.

Este método de medición utiliza un aparato de medición de resistencia (telurómetro), que es un analizador electrónico del tipo digital, que cuenta con cuatro electrodos, siendo los dos electrodos extremos, los de inyección de corriente de medida de corriente I , y los dos centrales, los electrodos de medida de potencial V .

En estas condiciones, la fórmula general para el cálculo de la resistividad, a partir del valor de la resistencia medida es:

Figura N° 1 Mediciones de Resistividad

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \quad \Omega\text{-m}$$



Donde:

- C1 y C2 Electrodos de inyección corriente.
- P1 y P2 Electrodos de medición de potencial.
- M Instrumento de medida de resistencia de tierra (Telurómetro).
- a Separación equidistante de electrodos en m.
- b Profundidad de clavado de los electrodos ($b \leq a/20$) en m.
- ρ Resistividad eléctrica del terreno en $\Omega\text{-m}$.
- R Resistencia eléctrica del terreno en Ω .



2.4 Consideraciones tomadas en la realización de la medición

Durante la realización de la medición de la resistividad del suelo, se deben considerar los siguientes puntos importantes descritos a continuación:

- La presencia de cuerpos metálicos, que pudieran perturbar las medidas de resistividad; ya que se pueden originar modificaciones de las trayectorias de las líneas de corriente en el suelo, y en consecuencia, del campo eléctrico sobre el punto de medida.
- Se efectúan mediciones con distintas separaciones entre los electrodos de medida.
- Los electrodos deben estar bien alineadas.
- Los electrodos deben estar espaciadas a igual distancia entre ellas.
- Los electrodos deben clavadas a una misma profundidad
- Se debe verificar que los electrodos utilizados estén limpios, principalmente de óxido, para posibilitar bien el contacto con el suelo.
- Se debe verificar el estado de la batería del equipo antes de la medición
- Se debe seleccionar la escala adecuada para cada medición realizada.

2.5 Equipos de Medición Utilizados

Los equipos de medición con los que se efectúan las mediciones de resistividad del terreno de una Línea de Transmisión, Subestaciones, Plantas Industriales, Centros mineros, etc.; el equipo que se utiliza es un telurómetro puede ser de marca MEGABRAS, FLUKE, DIGITAL KYORITSY, DIGITAL PRASEK PR 521, estos equipos vienen con sus accesorios como estuche, electrodos, cables de conexión y comba.

2.6 Análisis y procesamiento de las mediciones

2.6.1 Factores que influyen en la Resistividad Eléctrica del Terreno

Si bien los componentes más importantes del terreno (la sílice, el óxido de aluminio, etc.) son aislantes en estado seco, la resistividad eléctrica del terreno disminuye rápidamente en presencia de sales solubles y de la humedad.

Por otro lado, la composición de la tierra, incluso en un lugar determinado, es muy heterogénea. Las zonas superficiales en la que se instalan la toma de tierra tampoco son uniformes y están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, como lluvias y heladas.



Todo ello hace que la resistividad eléctrica sea muy variable de un lugar a otro, siendo afectada de manera muy notable, por los siguientes factores del terreno:

- **La composición química.**
- **Las sales solubles y su concentración.**
- **El estado higrométrico** (Cuerpo muy sensible a los cambios de humedad de la atmósfera).
- **La temperatura.**
- **La granulometría** (Se refiere a las proporciones relativas en que se encuentran las diferentes partículas minerales del suelo (grava, arena, limo y arcilla) expresada con base al peso seco del suelo (en %) después de la destrucción de los agregados).
- **La compactación.**
- **La estratigrafía** (cuerpos rocosos que forman la corteza terrestre).

Adicionalmente, cuando se realizan medidas de resistividad en zonas con presencia de mallas existentes, los valores obtenidos son frecuentemente menores a la resistividad real del terreno; lo recomendable en estos casos, es tomar las medidas del diseño original de la subestación.

2.6.2 Comportamiento Eléctrico del Suelo

Los suelos tienen diferentes conformaciones geológicas con basamentos y estratos de distinta formación cuya composición y características varían según la topografía del lugar.

La composición de los suelos determina su conductividad que es muy variable, su caracterización y clasificación por muestreo sólo tiene alcances locales limitados. Su conductividad (o su inversa), la Resistividad dependen de su contenido de humedad que es (>10%) para tierra de cultivo y (<1%) para suelos permeables o secos sin recargas de agua, y de los contenidos y composición de las sales solubles en cada estrato.

Los factores principales que afectan la resistividad de un terreno son los siguientes:

- Tipo de Suelo : Según su composición química y la presencia de electrolitos.
- Terreno : Según su formación: Peso, Gravedad, etc.
- Porosidad : Inclusiones esféricas vacías o llenas de humedad / aire.
- Humedad : Existencia de agua en los poros.
- Temperatura : Condiciones naturales extremas.

2.6.3 Unidades de Medidas y Rangos de la Conducción Eléctrica del Suelo

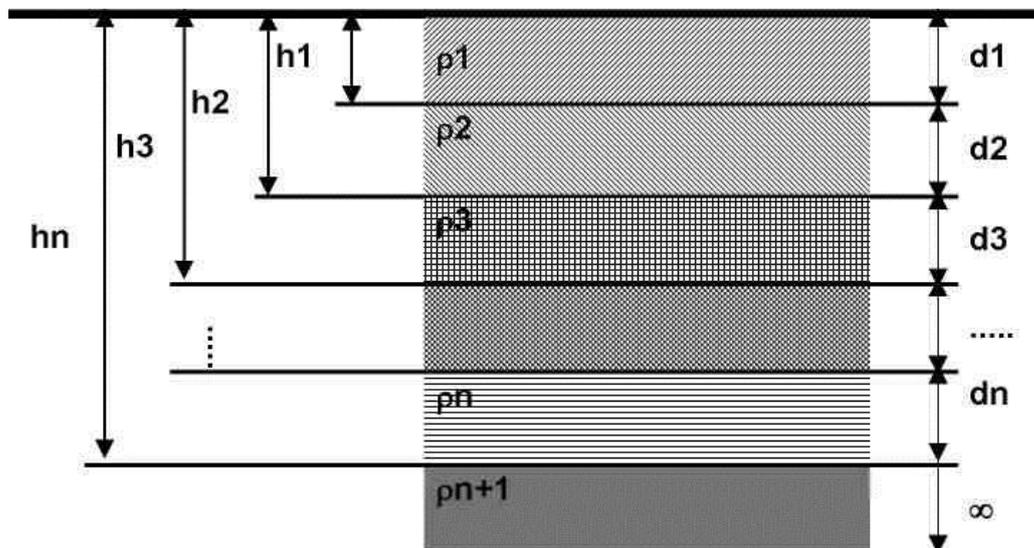
La aptitud de conducción eléctrica del suelo, se mide mediante su conductividad ($\mu\text{S}/\text{m}$) que implica magnitudes muy pequeñas de difícil medida en el campo, por lo que es más conveniente tomar su resistividad cuyas medidas son ($\Omega\text{-m}$) o bien ($\Omega\text{-cm}$).

Las variaciones de la conductividad del Suelo con la temperatura son mínimas alrededor de la temperatura media a Condiciones Normales (de $5\text{ }^\circ\text{C}$ a $9\text{ }^\circ\text{C}$) a 0,5 metros de profundidad; sin embargo, cerca de la temperatura de ebullición del agua son muy conductivos y en estado de congelamiento presentan muy altas Resistividades.

2.6.4 Análisis de la Información

Efectuadas las medidas de resistividad del terreno en el área del proyecto, el siguiente paso es conocer las características que presenta el suelo en virtud de su propia formación geológica a lo largo de los años (estratos), es así que se podrán obtener los modelos de estratos horizontales, como modelo de representación de las características del suelo, que en la práctica ha producido excelentes resultados.

Figura N° 2 Modelo de Estratificación de Estratos Horizontales



Donde:

h_1, h_2, \dots, h_n Profundidad del suelo

d_1, d_2, \dots, d_n Altura del estrato

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ Resistividad del estrato

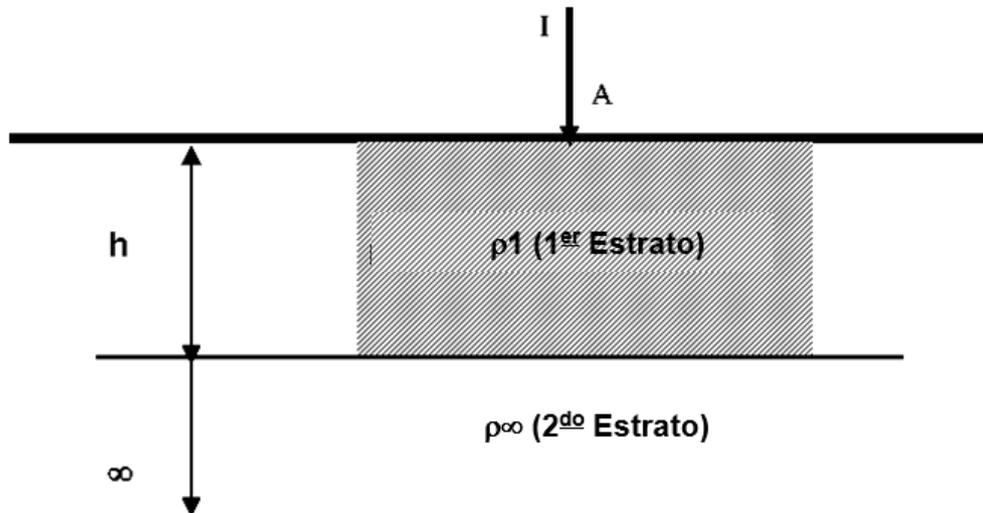
2.6.5 Estratificación del Suelo

Existen diversos métodos de estratificación del suelo, y uno de los más difundidos es el **Método de los Dos Estratos**, el cual se utilizará para el análisis de la información.

2.6.6 Modelamiento del Suelo de dos Estratos

Usando la teoría de electromagnetismo, es posible desarrollar un modelo matemático, que con auxilio de las medidas efectuadas por el método de Wenner, se puede calcular la resistividad del primer y segundo estrato, así como de su profundidad respectiva.

Una corriente eléctrica "I" ingresando por el punto "A", en un suelo de dos estratos tal como se muestra en la Figura No.1, genera potenciales en el primer estrato.



2.6.7 Metodología para la Estratificación del Terreno

El procedimiento para estratificar el terreno en dos estratos se realiza mediante el método de "Utilización de Curvas", que utiliza las mediciones de campo realizadas por el método de los tres electrodos.

Usando las teorías de electromagnetismo solo con dos estratos horizontales es posible resolver un modelo matemático, que con ayuda de las medidas efectuadas, posibilita encontrar la resistividad del primer y segundo estrato, con su respectiva profundidad.

Para el suelo de dos estratos, la (ρ_a) se obtiene a partir de la expresión general

$\rho_a \equiv 2\pi aR$ en la cual se reemplaza la expresión del potencial entre los electrodos (P1) y (P2) de espesores (h) e infinito, para un punto (p), situado a una distancia (a) metros.

$$V_p = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{a^2 + (2nd_1)^2}} \right]$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Donde:

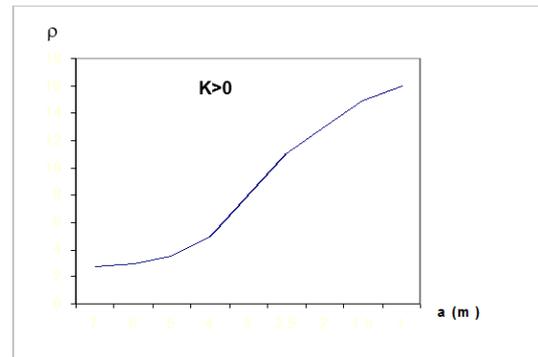
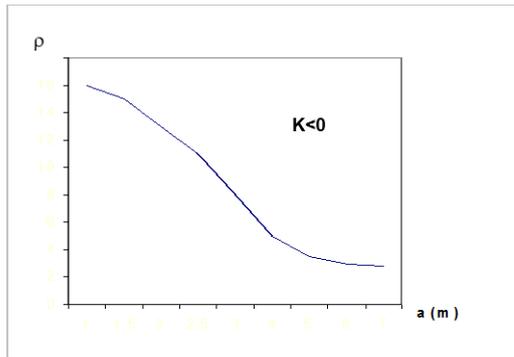
V_p : Potencial del punto "p" cualquiera del primer estrato en relación al infinito.

ρ_1 : Resistividad del primer estrato

ρ_2 : Resistividad del segundo estrato

K : Coeficiente de reflexión

h : Profundidad del primer estrato



2.6.8 Resultados de la Estratificación del Terreno

Se tiene que desarrollar la estratificación del terreno correspondiente a la zona donde se quiere instalar la malla de tierra profunda, para las supuestas mediciones desarrolladas, mediante la ayuda del programa CYMGrd, y los resultados se muestran a continuación:

Cuadro N°: 1 Resumen de Medición de Resistividad del Terreno

EJE	RESISTIVIDAD MEDIDA (Ω -m)						
	Espaciamiento - Profundidad						
	1 m	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m
1	24.94	14.16	11.33	8.53	6.03	3.67	0.96
2	19.85	12.08	10.63	15.29	7.31	3.50	0.77
3	21.14	14.66	12.84	9.13	6.13	3.82	1.01
4	23.80	13.59	9.91	10.15	6.01	3.79	0.98
5	25.95	16.80	10.46	8.21	5.88	3.62	0.90
6	21.68	13.58	9.45	8.56	9.40	3.63	0.76

7	26.64	14.86	12.03	9.23	6.73	4.37	1.66
8	25.84	13.66	10.60	8.25	6.21	3.74	0.85
9	35.30	18.95	11.58	9.95	8.01	4.92	1.30

Los resultados anteriores de la tabla son producto de la investigación y experiencia en cuanto a mediciones efectuadas en SE desarrolladas en proyectos para Construcciones Nuevas, y/o Ampliaciones de Subestaciones Eléctricas de Potencia, Para el Diseño de la Malla de Tierra Profunda para una Subestación Eléctrica de potencia, se considera el peor de los casos, caso contrario se calcula el promedio general de todos los valores de la tabla y se efectúa el Diseño.

Finalmente se obtiene la resistividad de diseño considerada para toda la subestación es la siguiente:

Cuadro Nº: 2 Resistividad de diseño

EJE	RESISTIVIDAD MEDIDA (Ω -m)						
	Espaciamiento - Profundidad						
	1 m	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m
9	35.30	18.95	11.58	9.95	8.01	4.92	1.30

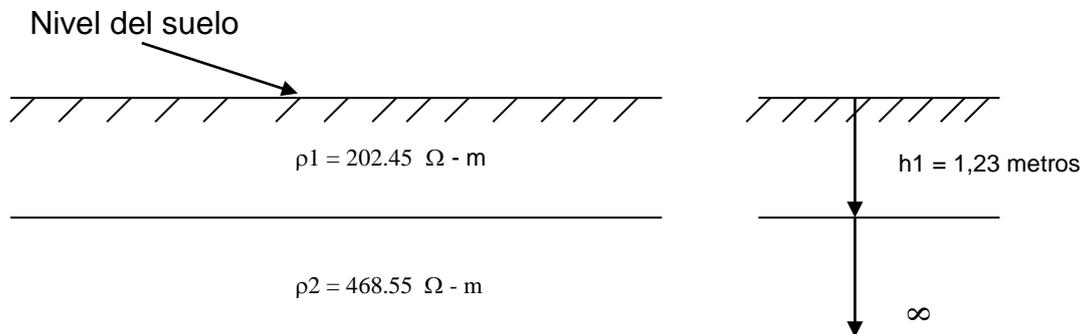
En el cuadro se muestran los valores de la resistividad considerando el peor de los casos para efectuar el diseño de la malla para la SE

2.6.9 Conclusiones del Estudio de Resistividad del Terreno

Las conclusiones importantes que se puede sacar después de efectuar las mediciones de resistividad del terreno en una Subestación Eléctrica de Potencia son las siguientes:

- El terreno debe ofrecer una baja resistividad en el estrato inferior, canalizándose dichas corrientes en la capa inferior.
- Se debe saber, que para una Subestación que cuentan con una malla de tierra profunda existente; deberá tomarse en cuenta esté en el momento de realizar las mediciones de resistividad.
- Con los supuestos resultados de las mediciones se puede decir que el terreno estará modelado por 2 estratos, siendo el primer estrato de **202.45** Ω -m, con una profundidad de **1.23** m y el segundo estrato de **468.55** Ω -m, tal como se muestra a continuación:

Figura N° 3 Resultados de Estratificación del Terreno



Se debe realizar el tratamiento del terreno, empleando tierra de cultivo y terreno propio para el desarrollo de las zanjas de la red de tierra profunda; y bentonita, tierra de cultivo en combinación con el terreno propio cernido, para los pozos de tierra.

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para el diseño del sistema de puesta a tierra se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se ha modelado la red de tierra, que permitirá analizar de manera adecuada el sistema de puesta a tierra de toda la subestación.
- Se considera una corriente de falla de **31.5 kA** (El valor lo obtuve del Programa Power Factory – DigSILENT 15.0.0 (Análisis de Cortocircuito en Barras, considerando la corriente de cortocircuito mayor en trifásico o monofásico), considerando un factor de 1.5).
- Se consideran las contribuciones realizadas por las líneas de transmisión (Línea en el momento de la falla a tierra analizada).
- Se considera que la resistencia de la malla de tierra de la subestación, sea $\leq 1\Omega$.
- El conductor de la red de tierra profunda existente es de cobre de 4/0 AWG.
- De acuerdo a las recomendaciones de la norma IEEE Std 80 "Guide for safety in AC Substations Grounding", el tiempo de despeje de falla debería ser lo menor posible, para reducir las posibilidades de shock eléctrico a una persona que se vea sometida a las tensiones originadas por la corriente de falla.
- Se ha utilizado un tiempo de actuación de 200ms para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de la subestación.



3.1 Funciones de la puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra deberá cumplir con las siguientes funciones:

- Proporcionar un circuito de baja impedancia, para la dispersión a tierra de las corrientes de falla monofásicas, ó cargas estáticas generadas en las carcasas de los equipos.
- Evitar que durante la circulación de estas corrientes a tierra, se puedan producir diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación, siendo un peligro para el personal.
- Facilitar la sensibilidad de los relés de protección, para la eliminación rápida de fallas a tierra.
- Dar mayor confiabilidad y continuidad de servicio eléctrico.

3.2 Procedimiento de cálculo

El cálculo de la malla a tierra ha sido desarrollado mediante programa computacional que utiliza los criterios de la norma IEEE Std 80 “Guide for safety in AC Substations Grounding” y que calcula la resistencia de puesta a tierra, las tensiones de toque y tensiones de paso, para ello se hace uso del software CYMGrd, especializado para determinar el sistema de puesta a tierra en subestaciones.

3.3 Diseño de la malla de puesta a tierra

Para el diseño de la malla de tierra para este trabajo se ha tomado en consideración los resultados obtenidos de los siguientes parámetros y de las siguientes consideraciones.

3.3.1 Resistividad del terreno

De los resultados del análisis de resistividad del terreno se tiene que éste será modelado eléctricamente en dos estratos, con las siguientes características:

- Resistividad del Primer Estrato : **202.45** Ω -m
- Resistividad del Segundo Estrato : **468.55** Ω -m
- Profundidad del Primer Estrato : **1,23** m

3.3.2 Determinación de la contribución de la corriente en la malla de tierra profunda y determinación de la relación X/R

Para el cálculo de la malla de puesta a tierra se calcula el efecto de los aportes ante una falla franca en la Barra en **60 kV** de la **S.E. Corongo**.

La norma IEEE 80 establece un método de cálculo para determinar estos porcentajes de contribución, empleando una serie de tablas cuyos resultados son aproximados. En mi caso el análisis lo realizare empleando el software Digsilent y el archivo pfd.

Del reporte se resume:

“Contribución telemandada” es la suma de las contribuciones (de la corriente de falla LG) de las líneas de transmisión (no de los reactores locales dentro de la subestación) dividida por la corriente de falla total y multiplicada por 100.

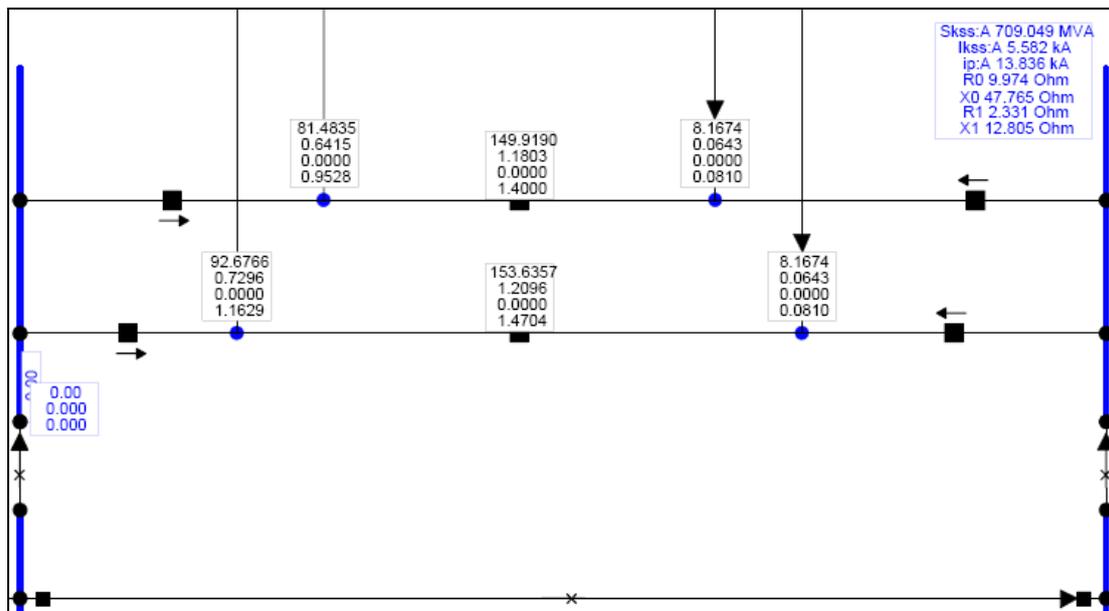
En nuestro caso tenemos:

- Barra en 60 kV: Contribución Líneas/Corriente Total = $5.11 / 5.56 = 91.9\%$

Cabe resaltar que dicho porcentaje de contribución será empleado para el cálculo de las tensiones de toque y paso, considerando una corriente de falla de **31.5 kA**.

La relación X/R se determina como: $(2x1+Xo) / (2R1+Ro)$ para la corriente de cortocircuito línea-tierra correspondiente.

Figura N° 4 Determinación de la Relación X/R Barra en 60 kV



De los datos obtenidos, la relación X/R es igual a 5.01 para la barra en 60 kV.

3.3.3 Determinación de la sección mínima del cable de la malla de puesta a tierra

El cable que se utiliza en la malla de puesta a tierra existente es de cobre desnudo, debido a su alta conductividad, resistencia a la corrosión al ser enterrado, y su comportamiento catódico respecto a otros metales.

Para determinar la sección mínima del cable, debido a los esfuerzos térmicos, se utilizó la siguiente fórmula:

$$A_{mm} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o - T_m}{K_o + T_a}\right)}}$$

Donde:

- A_{mm} : Sección del cable de Cobre (mm²).
- I : Corriente de falla monofásica, a través del cable (**31.5 kA**).
- T_m : Temperatura máxima permisible (**1083 °C**).
- K_o : (1/ α_r).
- T_a : Temperatura del ambiente (**10 °C**).
- t_c : Duración de la falla (**0,2 s**)
- α_r : Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura T_r (**1/°C**)
- ρ_r : Resistividad del conductor a la temperatura T_r ($\mu\Omega$ -cm)
- $TCAP$: Capacidad térmica por unidad de volumen del conductor (3.42J/cm³.°C)

Con los valores antes mencionados, se determina la sección mínima del cable de cobre y la sección mínima de la varilla requerida en la malla, validando las características del cable y la varilla utilizada

Cuadro N°: 3 Dimensionamiento del Conductor y la Varilla

Dimensionamiento del conductor (mínimo requerido)

Material	Conductividad (%)	Tm (°C)	Kf	Área (mm ²)	Calibre nominal
Copper anneal soft-drawn	100	1083	6.84382	50.4382	2/0AWG

Dimensionamiento de la varilla de tierra (mínimo requerido)

Material	Conductividad (%)	Tm (°C)	Kf	Diámetro (mm)	Calibre nominal
Copper clad steel 20%	20	1084	14.2952	11.5819	1/2"

Los materiales utilizados para la ampliación de la malla son:



- Red de tierra profunda : 4/0 AWG
- Derivaciones a equipos y/o estructuras : 4/0 AWG
- Varilla de cobre : 16 mm ϕ (5/8")

Como se puede apreciar, los materiales seleccionados se encuentran por encima de los valores mínimos requeridos por la malla de tierra profunda mostrados en el cuadro N°2, con esto se valida que los materiales seleccionados cumplen con los requerimientos técnicos.

El cable de cobre para la red de tierra superficial será de 4/0 AWG.

3.3.4 Datos de evaluación de las mallas

Para los datos de entrada al programa CYMGrd de CYME (software de diseño del sistema de puesta a tierra de subestaciones), se tuvieron en cuenta los resultados del modelo del suelo, los arreglos de la malla de tierra, la corriente de cortocircuito (31,5 kA), y los detalles de la malla tales como calibre, profundidad y dimensiones de las varillas de puesta a tierra.

Los datos de entrada requeridos por el programa CYMGrd para el análisis de la malla de la subestación son:

- Frecuencia nominal 60 Hz
- Corriente de falla LG 31 500 A
- Tiempo de duración de la falla 0,2 s
- Espesor de la estrato superior 1,23 metros
- Resistividad del estrato superior 202.45 Ω -m
- Resistividad del estrato inferior 468.55 Ω -m
- Resistividad de la grava 3 000 Ω -m
- Espesor de la grava 0,10 m
- Calibre del conductor principal 4/0 AWG
- Profundidad de enterramiento 0,8 m respecto del nivel de la grava
- Diámetro y longitud de la varilla 16 mm y 2400 mm

En la figura siguiente se muestra la distribución de los electrodos de la malla de tierra profunda existente. Cabe mencionar que en el presente documento se evalúa el comportamiento de la malla en el área proyectada.

Figura N° 5 Malla de Tierra Profunda –Vista en Planta 2D

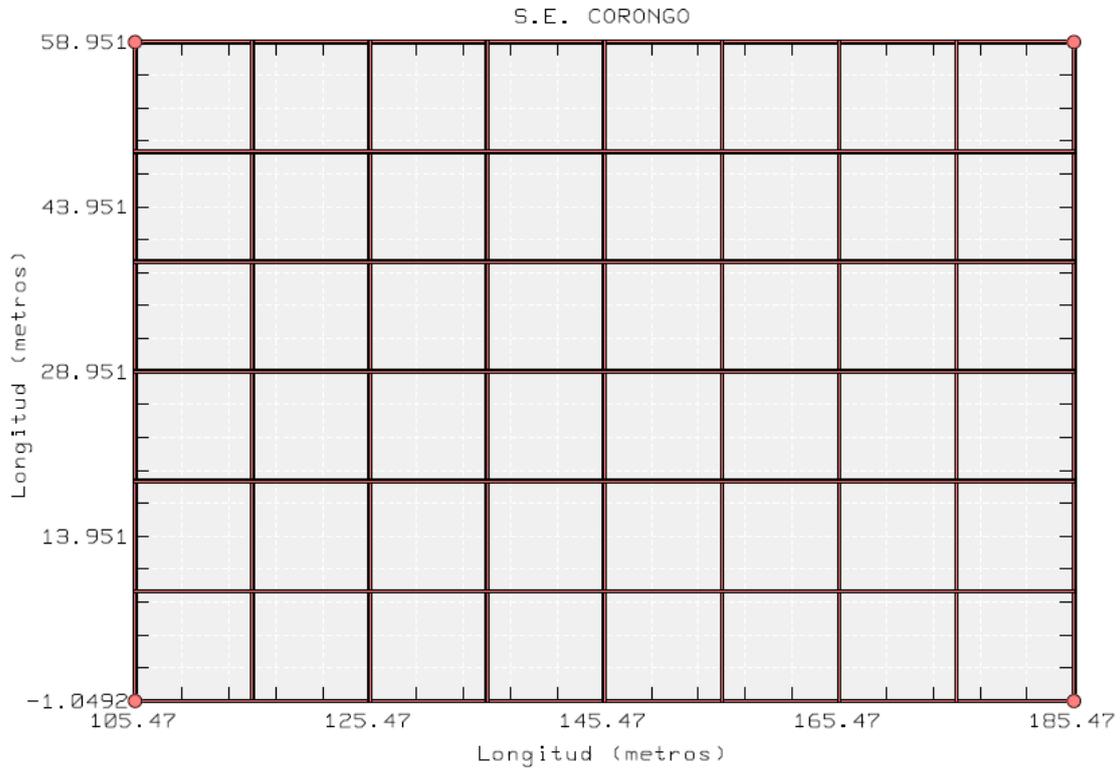
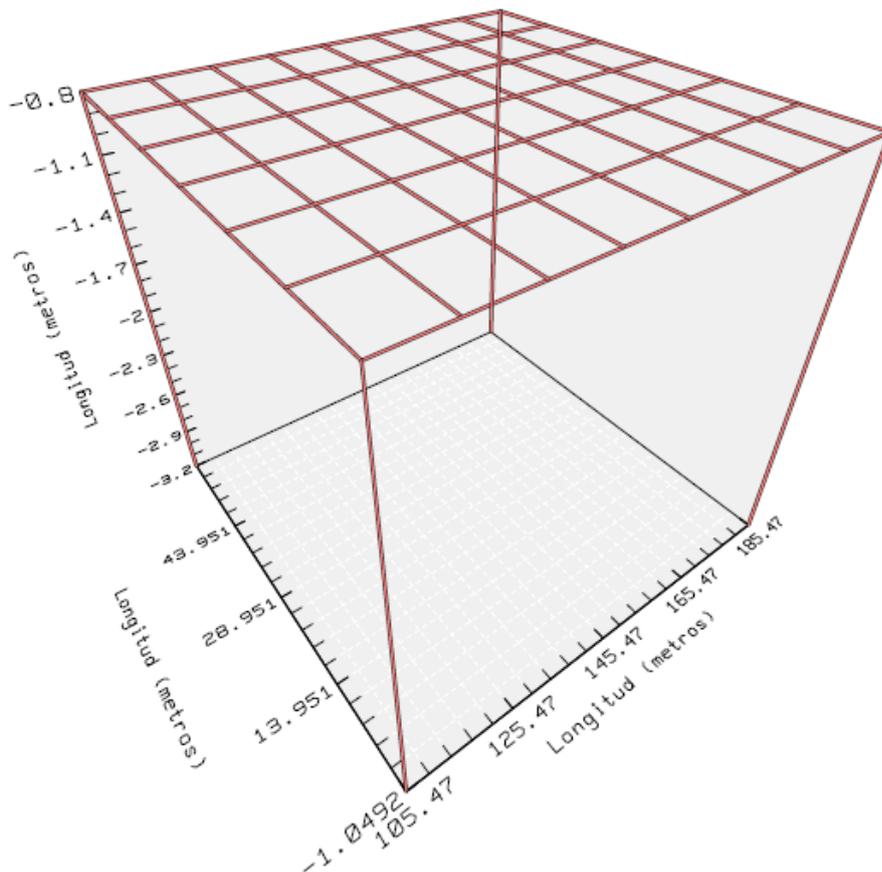


Figura N° 6 Malla de Tierra Profunda –Vista Isométrica 3D



Como se puede apreciar en la figura anterior, se ha simulado la malla de red de tierra, lo cual incluye el proyectado y las modificaciones y ampliaciones que esta requiere para el proyecto.

De la simulación de la malla de red de tierra, se obtienen los siguientes resultados:

- Elevación del potencial de tierra **8129.09** voltios
- Resistencia de tierra calculada **0.77734** Ω

La resistencia de la malla de puesta a tierra de toda la subestación será de **0,78**, valor que se encuentra por debajo de lo recomendado para este tipo de instalaciones.

3.3.5 Tensiones máximas admisibles de toque y de paso

Las situaciones típicas de choque eléctrico que involucran a una persona en una instalación durante una falla son: pie-pie desarrollándose tensiones de paso y mano pie, mano-mano desarrollándose tensiones de toque. La seguridad de una persona consiste en determinar el nivel de tensión que es capaz de soportar durante un determinado tiempo sin sufrir daño.

Las máximas tensiones de toque y de paso están dadas por las siguientes fórmulas:

Para personas con un peso de **50 kg**.

$$E_{TOQUE} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} V \quad E_{PASO} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} V$$

Para personas con un peso de **70 kg**.

$$E_{TOQUE} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t}} V \quad E_{PASO} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t}} V$$

Donde:

- t : Duración de la corriente de falla.
- C_s : Factor de reducción, depende de características de la capa de grava.

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09}$$

- ρ : Resistividad aparente del terreno.
- ρ_s : Resistividad de la grava.
- h_s : Altura de la capa de grava.

3.3.6 Tensiones de toque y de paso durante una falla

Según la norma IEEE Std 80 (2000), las tensiones de toque y de paso que aparecen al ocurrir una falla, se calculan con las ecuaciones siguientes:



➤ **Tensión de paso** de diseño

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot J_G}{L_s}$$

➤ **Tensión de Toque** de diseño

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot J_G}{L_M}$$

Dónde: ρ es la resistividad equivalente del terreno.

Factores de corrección:

Factor de Irregularidad:

$$K_i = 0,644 + 0,148n$$

Factor de Espaciamiento:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$$

Factor de Esparcimiento:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4D} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

Factores de Peso:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}}$$

$$K_h = \sqrt{1+h}$$

Longitud efectiva:

$$L_M = L_C + n_j L_j \qquad L_s = 0,75L_C + 0,85n_j L_j$$

Factor geométrico:

$$n = \frac{2L_C}{L_p} \times \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}$$

IMPORTANTE:

En el diseño debe de cumplirse que las tensiones admisibles deben de ser siempre menores que las tensiones que se producen en la malla de tierra al ocurrir una falla. Este modelo se ha realizado considerando toda el área de la subestación (la SE e de 60mx80m), a partir del cual obtenemos la resistencia equivalente de toda la malla; pero hacemos énfasis en el cálculo de las tensiones superficie, toque y paso solo en el área de ampliación de la subestación.

A continuación se detallan los resultados obtenidos:

Niveles de umbral del potencial:

Elevación del potencial de tierra : **8129.09** voltios

Tensión máxima de paso : **3577.1** voltios

Tensión máxima de contacto : **1088.81** voltios

Tensiones máximas obtenidas en la zona correspondiente a la ampliación de la subestación son:

Potenciales de superficie : **8129.09** voltios

Potenciales de paso : **201.05** voltios

Potenciales de contacto : **886.476** voltios

Como se puede apreciar, los valores obtenidos se encuentran por debajo de los niveles de umbral máximos permitidos.

3.3.7 Perfiles de potencial

Se evaluarán 3 perfiles de potencial en la zona de la subestación; el primero corresponde a la diagonal que se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura N° 7 Diagonal analizada para Perfiles de Potencial – Caso 1

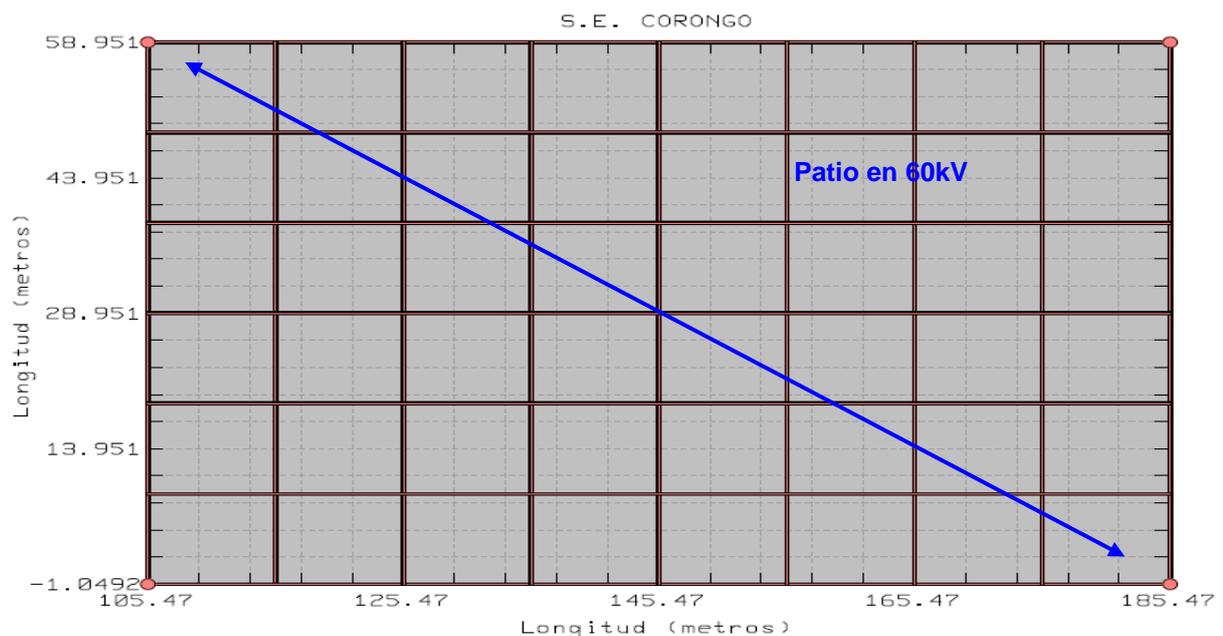


Figura N° 8 Perfil de Potenciales de Superficie – Caso 1

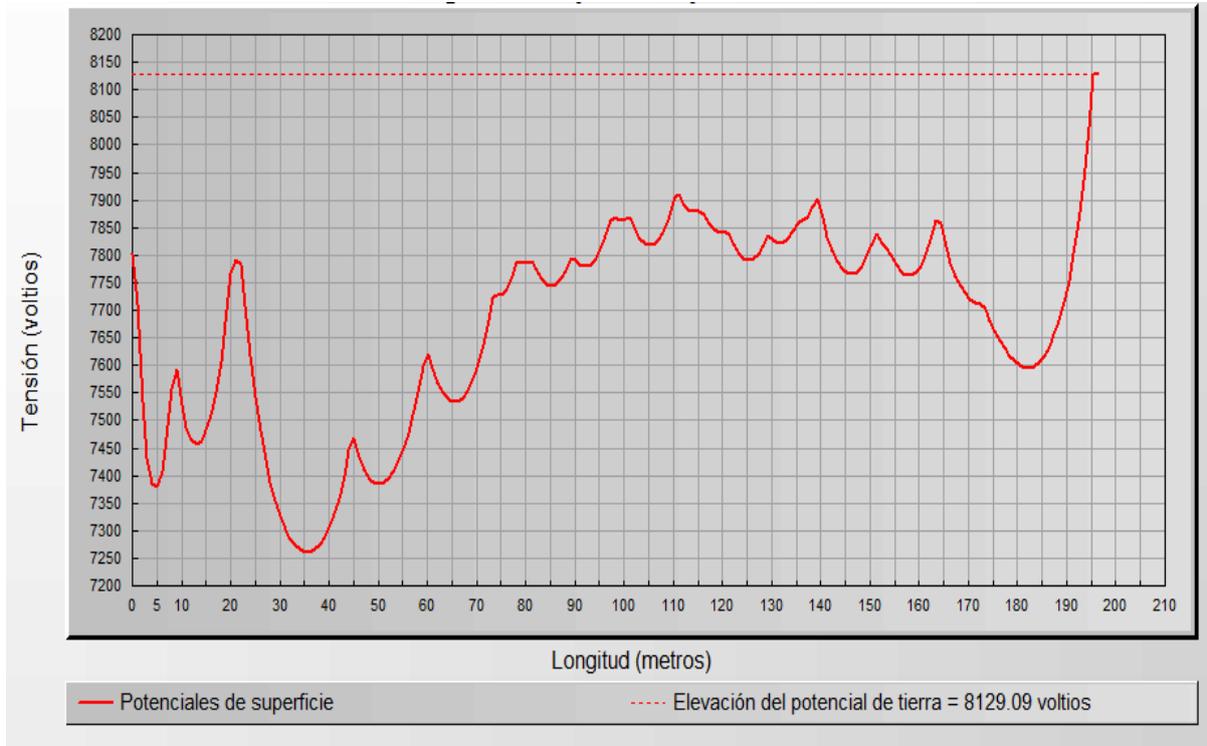


Figura N° 9 Perfil de Potenciales de Paso – Caso 1

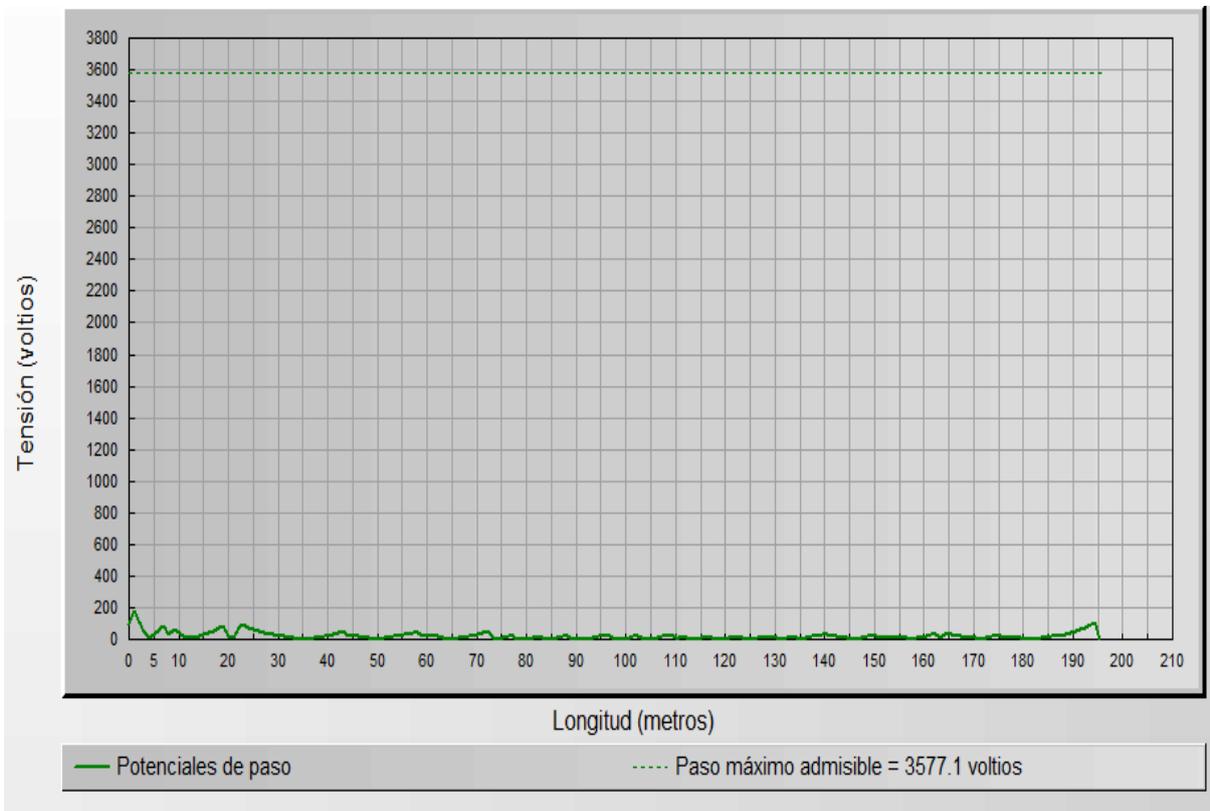


Figura N° 12 Perfil de Potenciales de Superficie – Caso 2

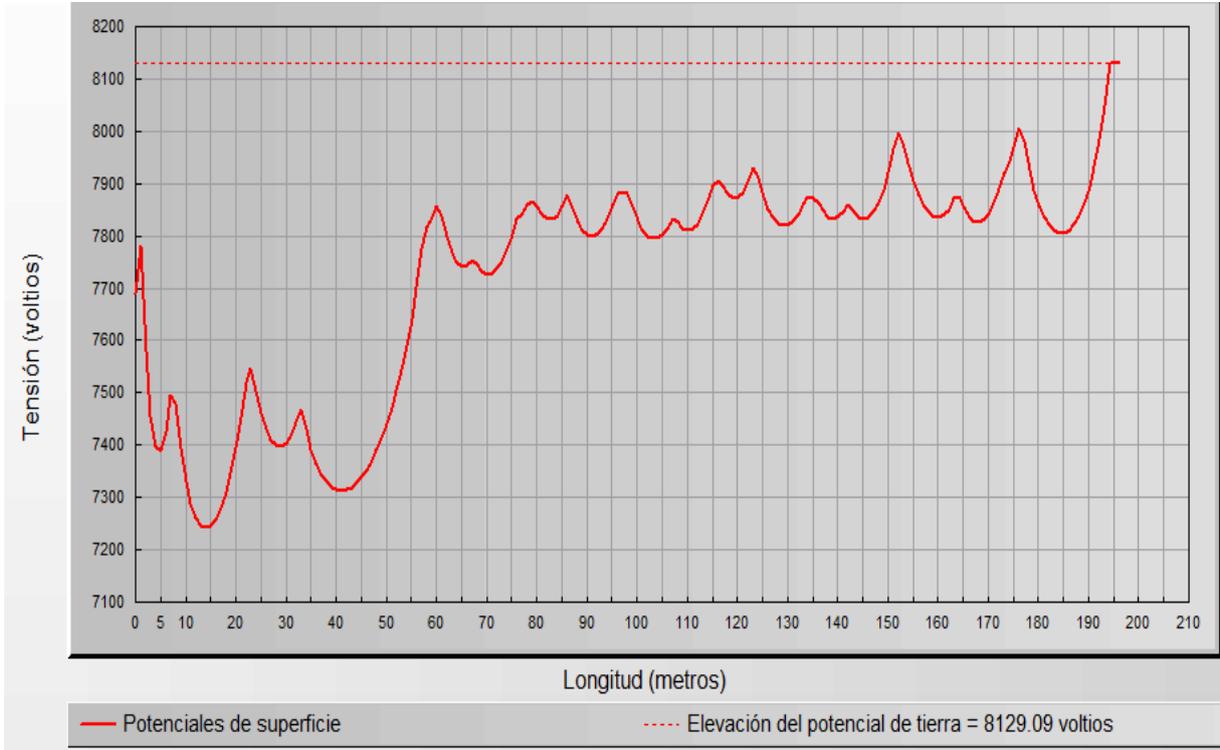


Figura N° 13 Perfil de Potenciales de Paso – Caso 2

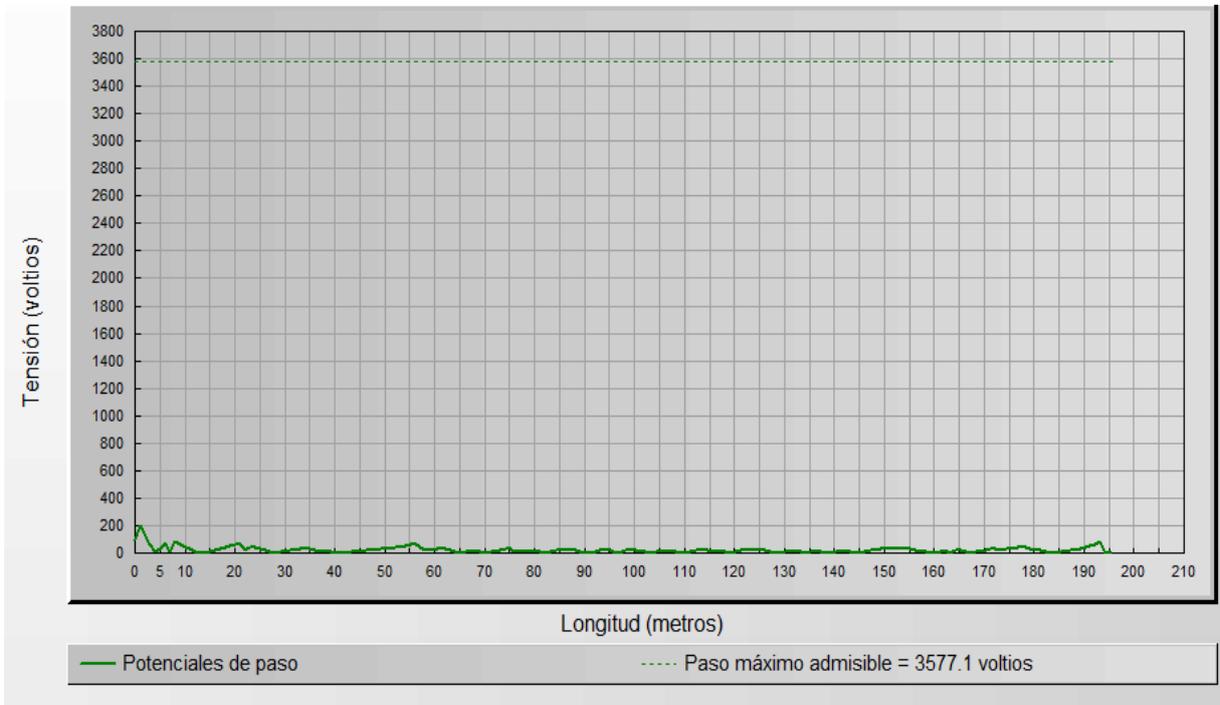
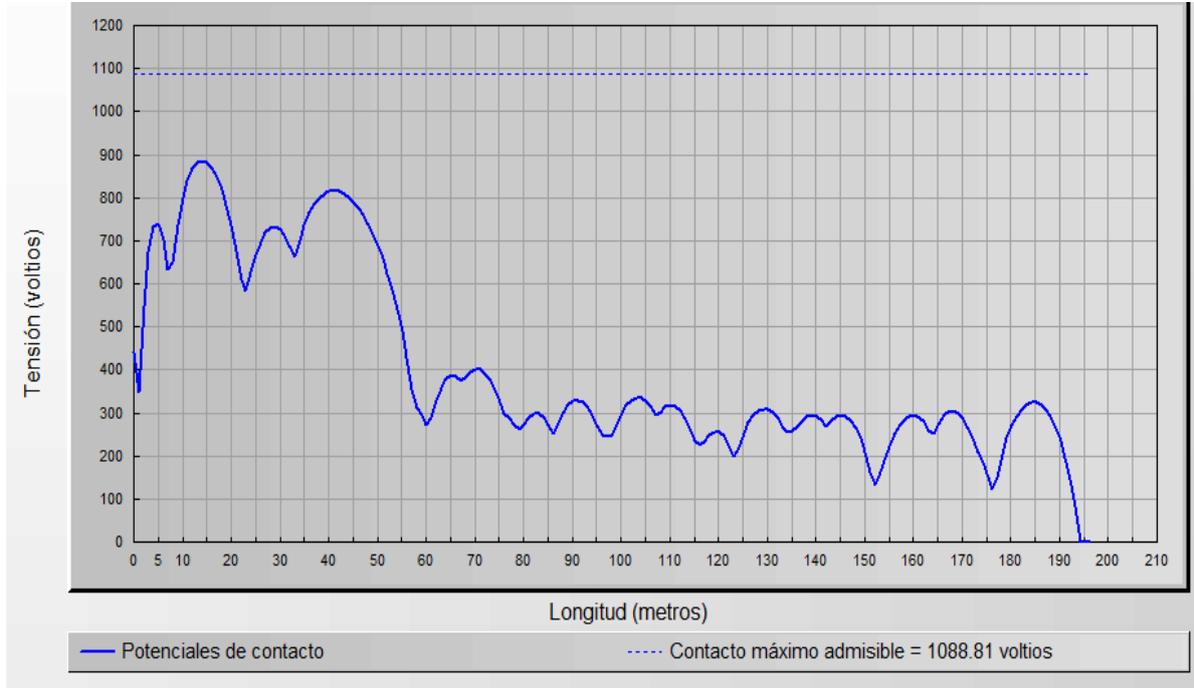


Figura N° 14 Perfil de Potenciales de Contacto (Toque) – Caso 2



El Tercer caso corresponde a la diagonal que se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura N° 15 Diagonal analizada para Perfiles de Potencial – Caso 3

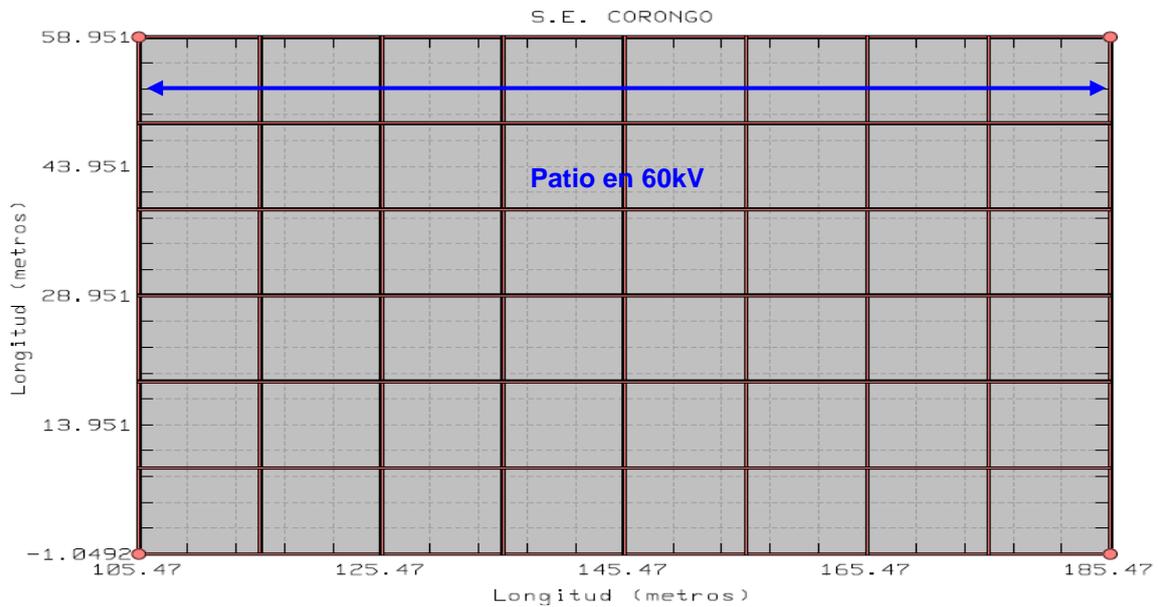


Figura N° 16 Perfil de Potenciales de Superficie – Caso 3

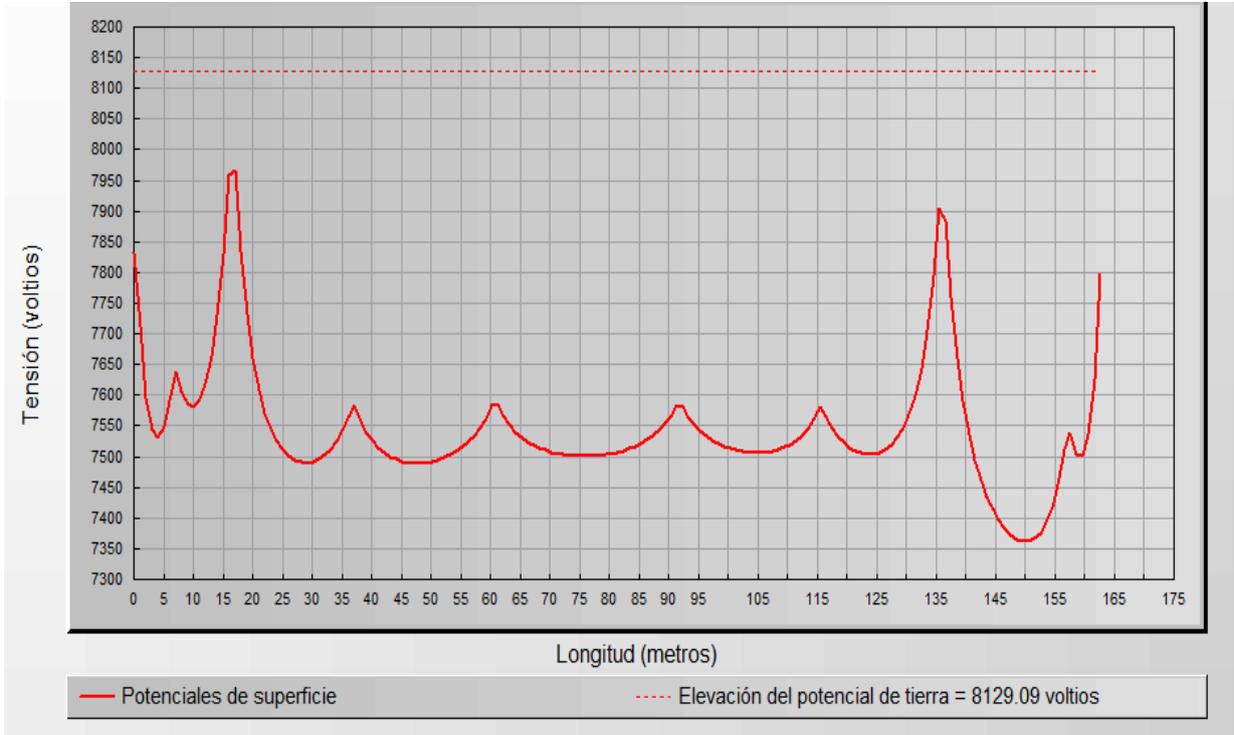


Figura N° 17 Perfil de Potenciales de Paso – Caso 2

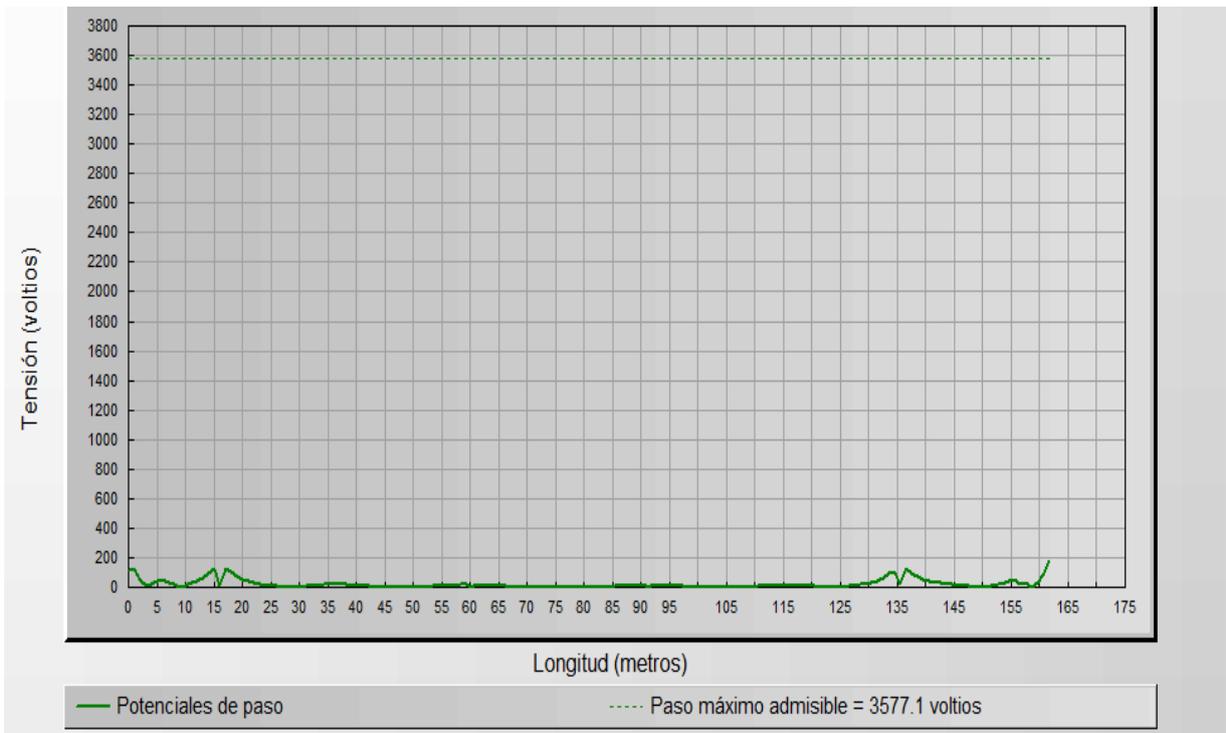
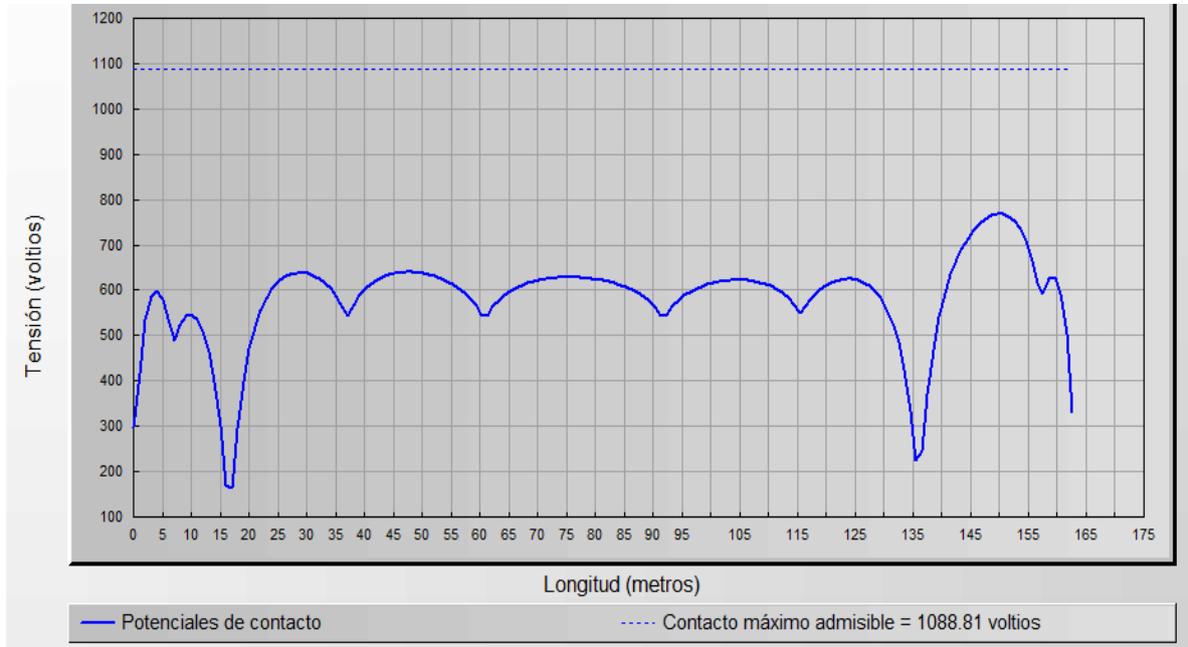


Figura N° 18 Perfil de Potenciales de Contacto (Toque) – Caso 2



Los perfiles de potencial graficados demuestran que los valores de tensión obtenidos dentro del área del proyecto se encuentran por debajo de los límites máximos permitidos.

3.3.8 Superficies de tensión de CONTACTO

Figura N° 19 Superficie de Tensión de Contacto (Toque)-Planta

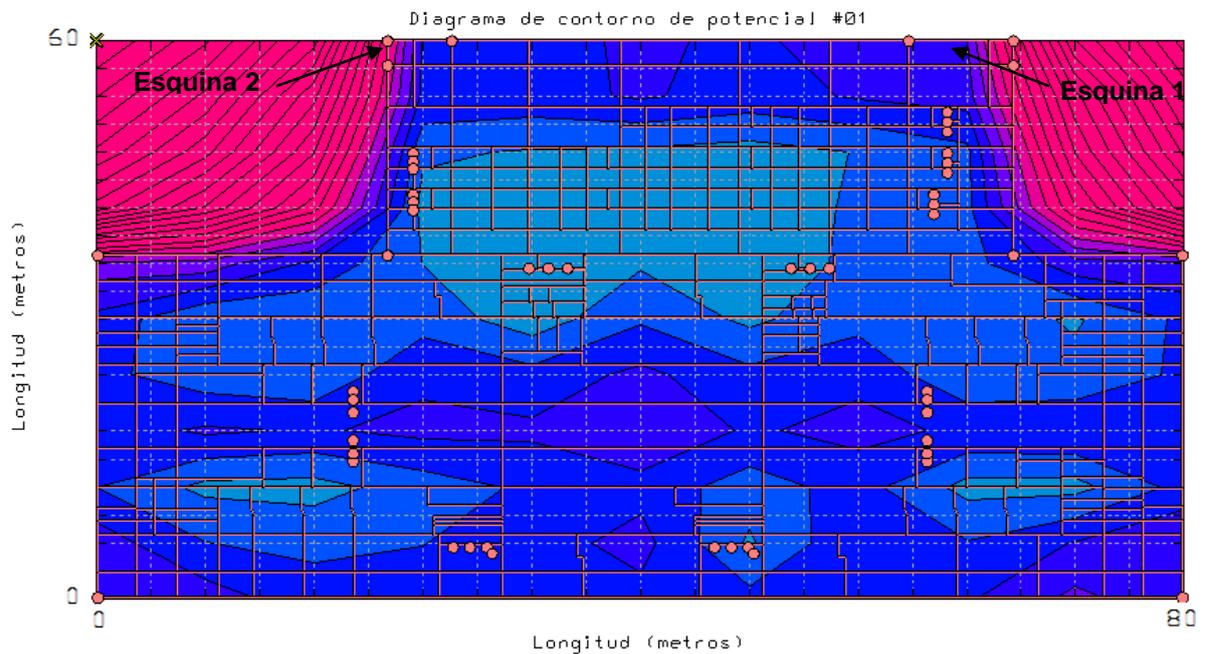


Figura N° 20 Superficie de Tensión de Contacto (Toque)-Zoom de Esquinas 1 y 2

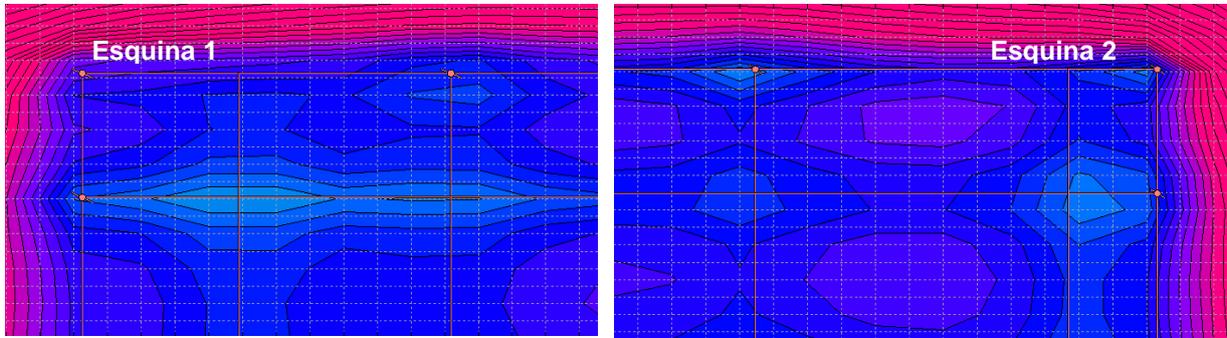
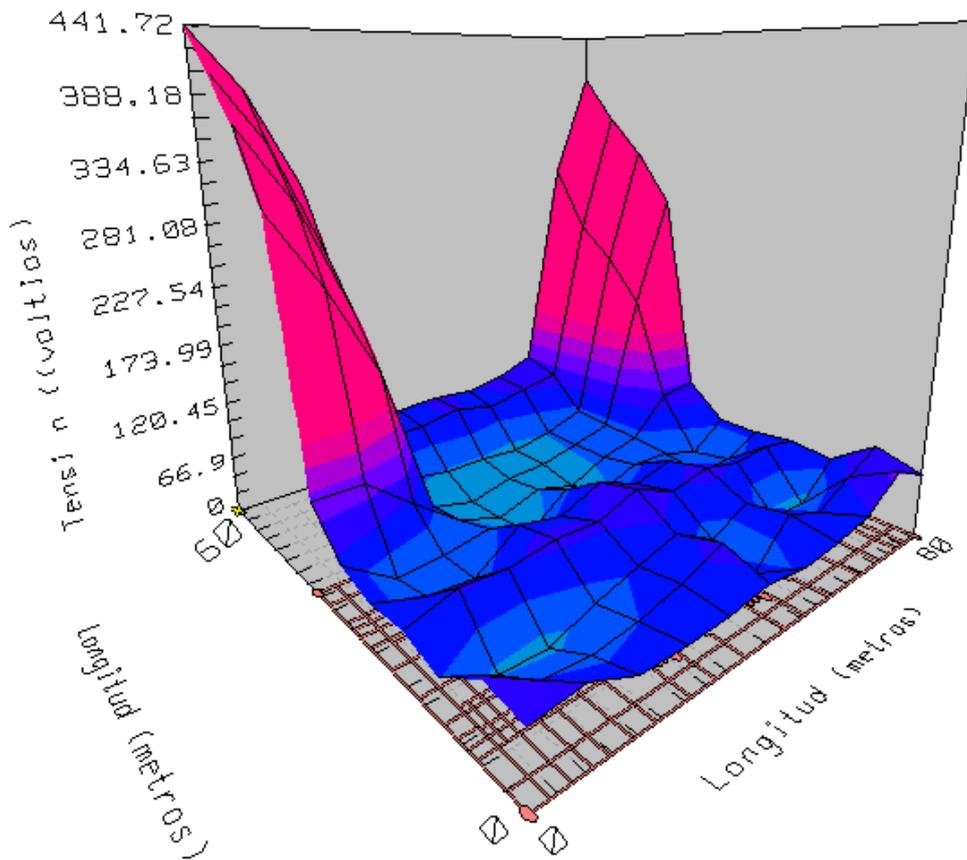
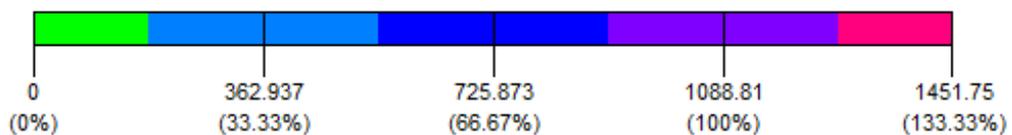


Figura N° 21 Superficie de Tensión de Contacto (Toque)-3D



Niveles de umbral del potencial de contacto

Tensión máxima de contacto 1088.81 voltios



Como se puede apreciar, los valores de tensiones de contacto (toque) dentro del patio de llaves de toda la subestación se encuentran dentro de los límites permitidos.

3.3.9 Tensión de superficie

Figura N° 22 Tensión de Superficie – Planta

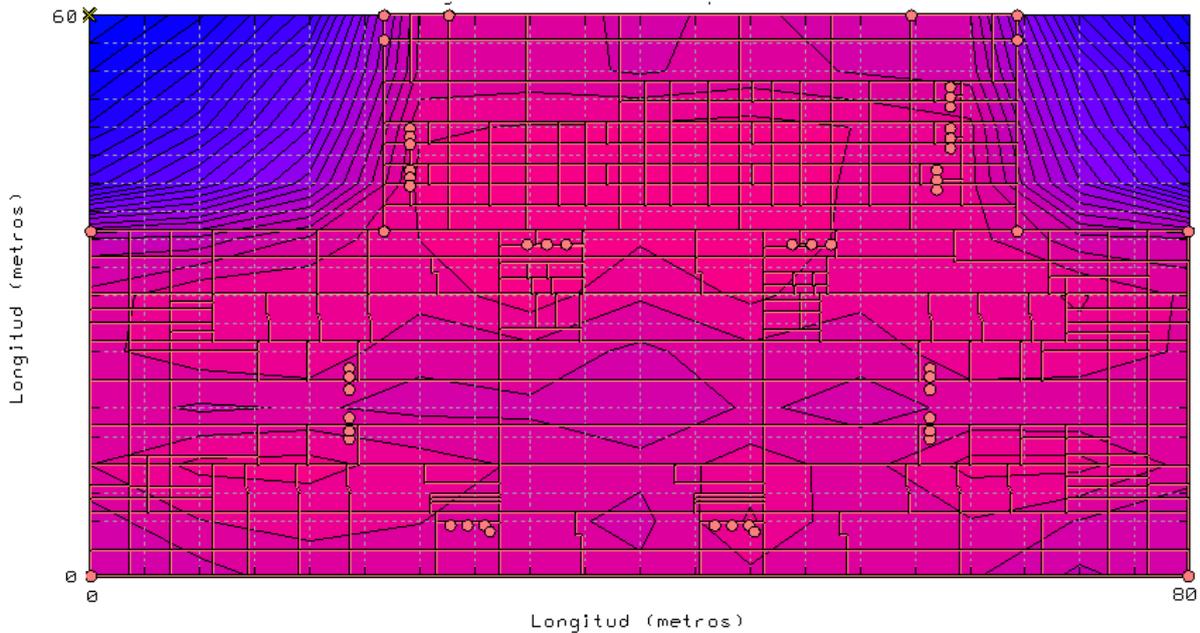
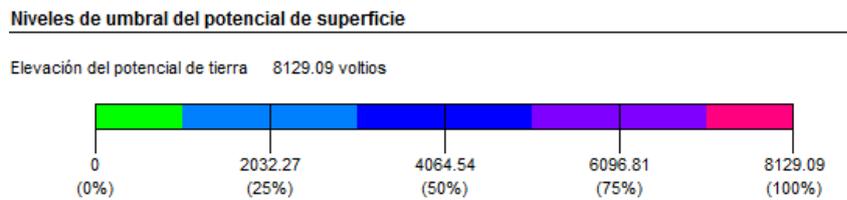


Figura N° 23 Tensión de Superficie – 3D



Como se puede apreciar, los valores de tensiones de superficie se encuentran dentro de los límites permitidos en toda el área de la subestación, dentro del área del proyecto.



4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos durante la validación del diseño de la malla de puesta a tierra se puede concluir lo siguiente:

- El diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Corongo considera que las corrientes de falla a tierra serán disipadas por la malla de tierra profunda.
- El sistema de malla de tierra de la Subestación Corongo, estará conformada por conductor de cobre desnudo de 4/0 AWG, a una profundidad de 0.7 m, respecto al nivel de la grava. Para la red de tierra superficial se utilizará una sección de conductor de cobre de 4/0 AWG. Adicionalmente se añadirán varillas de cobre de 16mm² x 2,4 m dentro de la malla de tierra en toda la subestación.
- Se ha considerado la utilización de grava con una altura de 10 cm para la ampliación del patio de llaves de la subestación, similar a lo existente.
- La resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación Corongo será de **0,78 Ω**, valor que se encuentra por debajo de lo recomendado para este tipo de instalaciones.
- De los resultados obtenidos en las simulaciones del software CYMGrd, se pudo observar que la disposición de los conductores en la malla hacen que no se presenten tensiones de toque y paso superiores a las máximas permisivas dentro del área del proyecto (Tmax de Toque=1088.81; Tmax de paso=3577.1), siendo los valores máximos presentados en el área del proyecto Ttoque=886.476 y Tpaso=201.05. Por lo tanto ante una falla en la subestación las personas estarán protegidas contra sus efectos. Así mismo se puede apreciar, a través del código de colores que identifican los valores de las tensiones de toque y paso, que en la zona correspondiente a la subestación existente dichos valores están por debajo del máximo a soportar.
- El potencial de superficie, según el Código Nacional de Electricidad (CNE) debe ser menor a 5000 V, presentándose en nuestro caso 8129.09 V; con lo cual aparentemente no se cumpliría dicha condición. Sin embargo el mismo CNE indica que en casos en los cuales no se cumpla con dicho valor se debe garantizar que el potencial de superficie este por debajo del nivel de aislamiento de los equipos de la subestación, lo cual si se cumple a cabalidad. Por lo tanto se puede concluir que se cumple con los requisitos del potencial de superficie.
- Para el diseño del sistema de puesta a tierra de la SE Corongo considere una corriente de Cortocircuito de 31.5kA.



5. BIBLIOGRAFIA

5.1 Libros y Normas Internacionales

- [1] ANSI/IEEE. (1983). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potential of a Ground System. ANSI/IEEE Std 81-1983 (Revision of IEEE std 81 1962).
- [2] IEEE. (2000). IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE. doi:10.1109/IEEESTD.2000.91902
- [3] Método para medir la resistencia de puesta a tierra de grandes sistemas. Jorge Humberto Sanz A. Revista Scientia et Technica N°21. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [4] Apuntes personales de profesor Ing. Ramos Torres, Ernesto y Notas de Clase del curso de Alta Tensión.
- [5] Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011

5.2 Páginas Web, Referencias Virtuales, Tutoriales

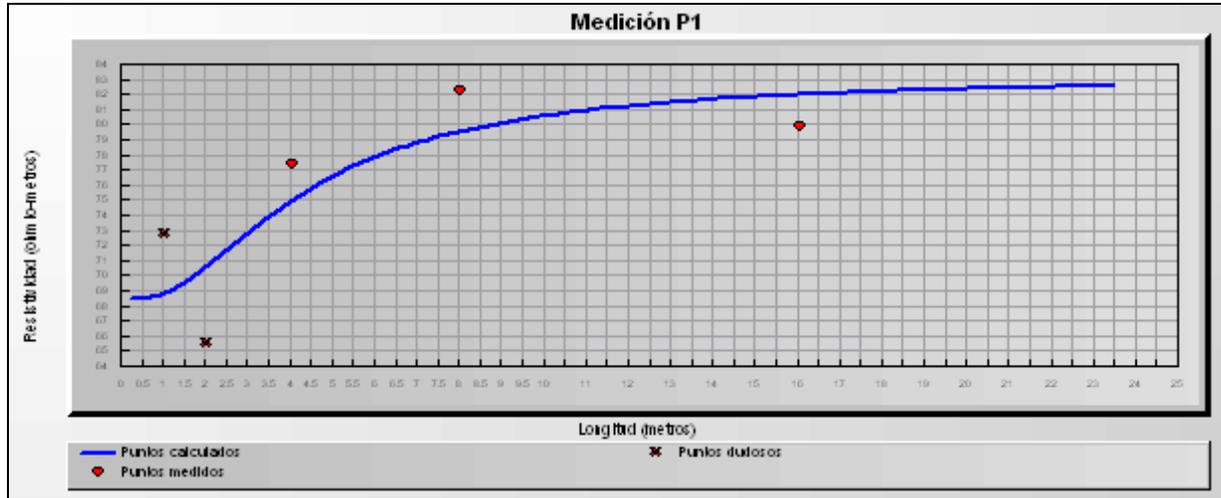
- [1] Power Factory. (<http://www.digsilent.de/index.php/products>).
- [2] <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/3/eduardoantonioicanoplata.2010.pdf>.
- [3] <http://www.dee.ufrj.br/~acsl/grad/equipamentos/IEEE-std80.pdf>.
- [4] CYME Internacional – Software CYMGrd

6. ANEXOS

- 1.0 Reporte del análisis de suelo
- 2.0 Determinación de la sección mínima del cable y de la varilla
- 3.0 Reporte de análisis de la malla

Anexo 2.0

Reporte del Análisis del Suelo – Medición P1 –en 60 kV



Parámetros

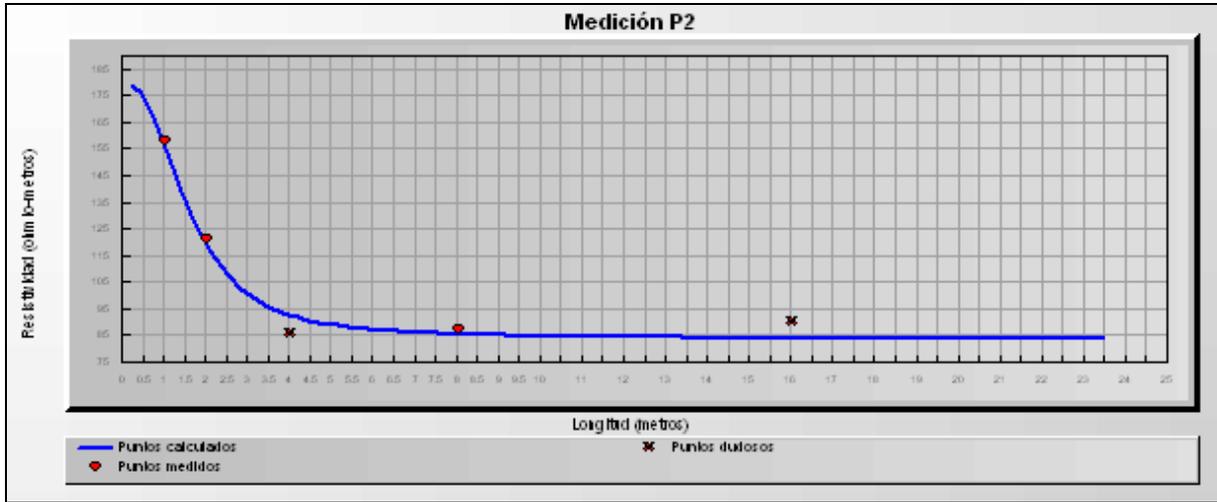
Título	Medición P1
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.2 secs

Resultados de salida

Espesor de la capa superior	2.19 metros
Resistividad de la capa superior	68.45 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	83.12 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.696736
Tensión máxima de contacto	1072.63 voltios
Tensión máxima de paso	3512.38 voltios

Reporte del Análisis de Suelo

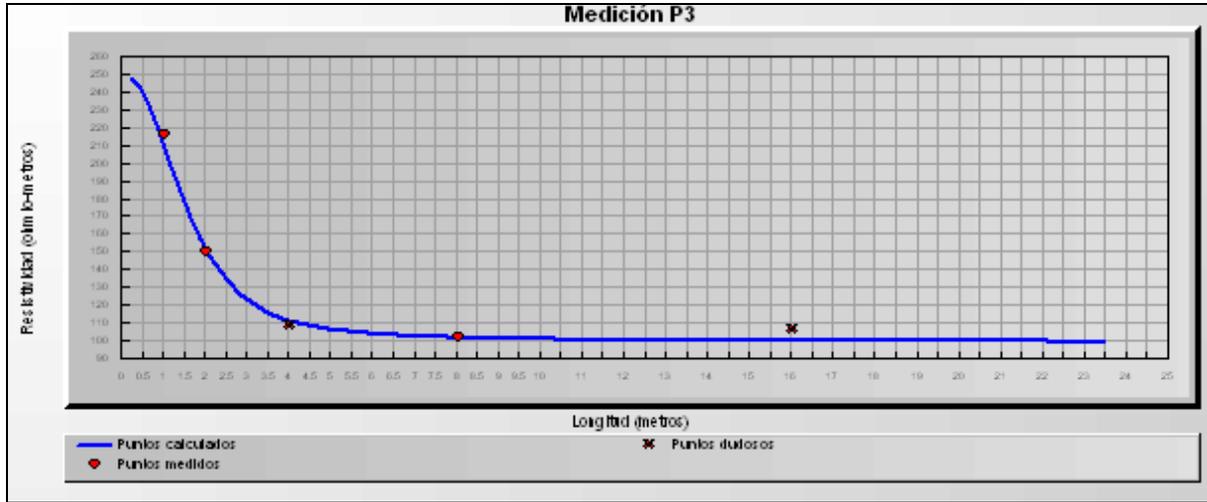
Reporte del Análisis del Suelo – Medición P2 –en 60 kV



Parámetros	
Título	Medición P2
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.2 secs
Resultados de salida	
Espesor de la capa superior	1 metros
Resistividad de la capa superior	179.89 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	83.57 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.708264
Tensión máxima de contacto	1086.09 voltios
Tensión máxima de paso	3566.21 voltios

Reporte del Análisis de Suelo

Reporte del Análisis del Suelo – Medición P3 –en 60 kV



Parámetros

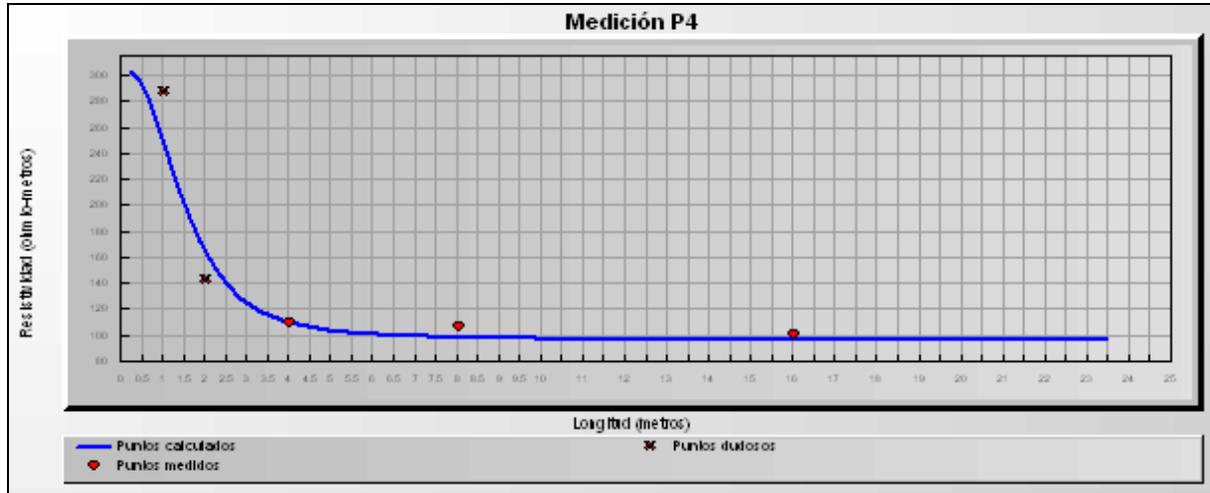
Título	Medición P3
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.2 secs

Resultados de salida

Espesor de la capa superior	1 metros
Resistividad de la capa superior	248.17 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	99.2 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.715328
Tensión máxima de contacto	1094.33 voltios
Tensión máxima de paso	3599.19 voltios

Reporte del Análisis de Suelo

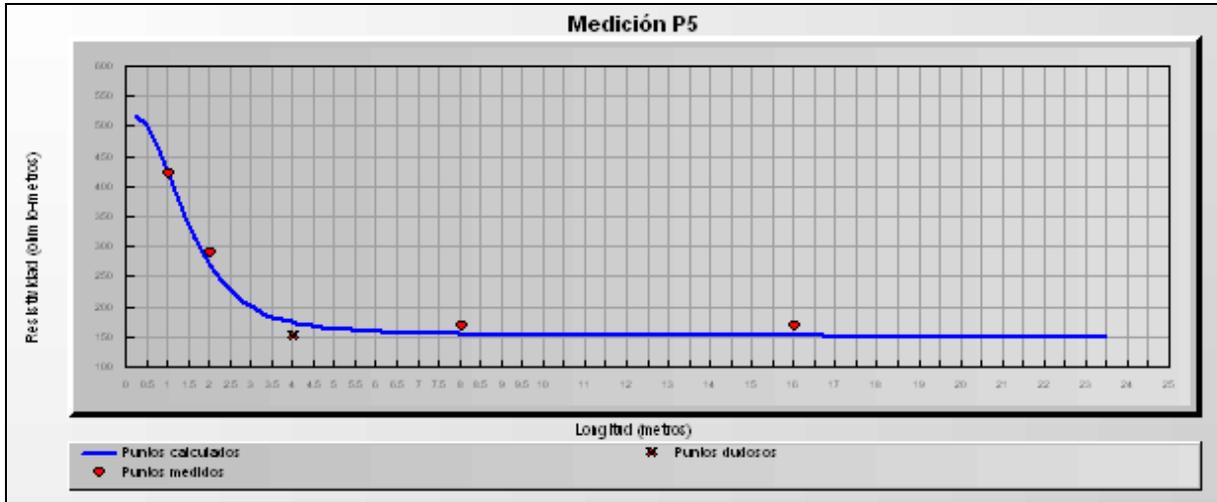
Reporte del Análisis del Suelo – Medición P4 –en 60 kV



Parámetros	
Título	Medición P4
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.2 secs
Resultados de salida	
Espesor de la capa superior	1 metros
Resistividad de la capa superior	304.53 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	95.72 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.721158
Tensión máxima de contacto	1101.14 voltios
Tensión máxima de paso	3626.41 voltios

Reporte del Análisis de Suelo

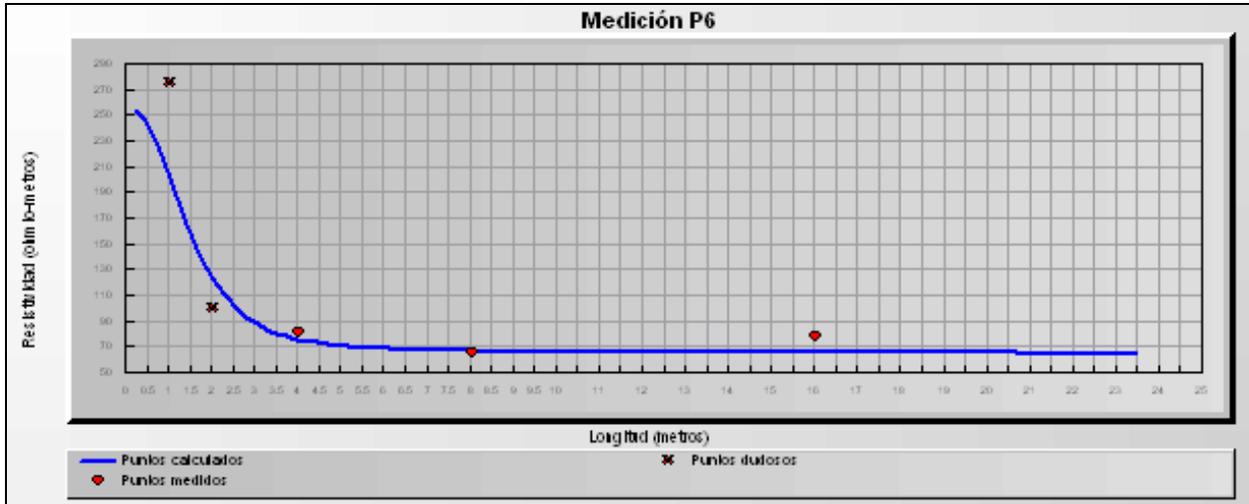
Reporte del Análisis del Suelo – Medición P5 –en 60 kV



Parámetros	
Título	Medición P5
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.2 secs
Resultados de salida	
Espesor de la capa superior	1 metros
Resistividad de la capa superior	521.64 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	150.11 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.743618
Tensión máxima de contacto	1127.36 voltios
Tensión máxima de paso	3731.27 voltios

Reporte del Análisis de Suelo

Reporte del Análisis del Suelo – Medición P6 –en 60 kV



Parámetros	
Título	Medición P6
Modelo de suelo	Estratificado en 2 capas
Modelo securitario	IEEE Std. 80-2000
Peso corporal	50 kg
Espesor de la capa superficial	0.1 metros
Resistividad de la capa superficial	3000 ohm-m
Duración del choque eléctrico	0.2 secs
Resultados de salida	
Espesor de la capa superior	1 metros
Resistividad de la capa superior	254.67 ohm-m
Resistividad de la capa inferior	64.75 ohm-m
Factor Cs de reducción	0.716
Tensión máxima de contacto	1095.12 voltios
Tensión máxima de paso	3602.33 voltios

Reporte del Análisis de Suelo

Anexo 3.0 Determinación de la Sección Mínima del Cable y de la de varilla

Parámetros					
Nombre de la barra	220 kV				
Corriente de falla LG	31500 amps				
Duración de la falla	0.2 secs				
Temperatura ambiente	10 °C				
Resultados de salida					
Factor de decremento	1.03269				
Dimensionamiento del conductor (mínimo requerido)					
Material	Conductividad (%)	Tm (°C)	Kf	Área (mm ²)	Calibre nominal
Copper anneal soft-drawn	100	1083	6.76188	49.8343	2/0AWG
Dimensionamiento de la varilla de tierra (mínimo requerido)					
Material	Conductividad (%)	Tm (°C)	Kf	Diámetro (mm)	Calibre nominal
Copper clad steel 20%	20	1084	14.1275	11.5138	1/2"

Anexo 4.0 Reporte de Análisis de la Malla

Parámetros			
Spec. Z paralelo equivalente	Factor de corte de la corriente		
Frecuencia nominal	60 hz		
Nombre de la barra	60 kV		
Corriente de falla LG	31500 amps		
Contribución a distancia	91.9 %		
LG X/R	5.01		
Rtg	15 ohmios		
Líneas de transmisión	7		
Rdg	25 ohmios		
Líneas de distribución	0		
Duración del choque eléctrico	0.2 secs		
Espesor de la capa superior	1.225 metros		
Resistividad de la capa superior	202.445 ohm-m		
Resistividad de la capa inferior	468.545 ohm-m		
Resistividad del revestimiento de la pica de tierra	15 ohm-m		
Resultados de salida			
Z paralelo (Interpolado)	0.418222 ohmios	Elevación del potencial de tierra	8136.45 voltios
Factor de corte	0.320936	Resistencia de tierra calculada	0.779358 ohmios
Factor de decremento	1.03269	Impedancia equivalente	0.27217 ohmios