

MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES

LUIS CARLOS HERRERA PIÑA

Ingeniero Electricista

OSCAR FERNANDO SIERRA MATAJIRA

Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2019**



Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	4
1.1.	FUNCIONES DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA	5
2.	PRINCIPALES CONSIDERACIONES Y CRITERIOS PARA EL DISEÑO SEGÚN IEEE Std 80... 7	
2.1.	Parámetros Críticos.....	7
2.1.1.	Corriente máxima a disipar por la malla (I_G)	7
2.1.2.	Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)	7
2.1.3.	Factor de decremento (D_F)	8
2.1.4.	Factor de crecimiento (C_P).....	9
2.1.5.	Cálculo del factor de división de corriente (S_F)	9
2.1.6.	Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s).....	11
2.2.	Geometría de la malla.....	11
2.3.	Resistividad de la capa superficial (ρ_s).....	11
2.4.	Resistividad del terreno (ρ).....	12
2.5.	Medidas de resistividad	13
2.6.	Interpretación de las medidas de resistividad del suelo	14
2.7.	Selección del tamaño del conductor	17
2.8.	Criterio de tensiones de paso y de toque tolerables.....	19
3.	EVALUACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	20
3.1.	Especificaciones requeridas.....	20
3.2.	Método simplificado de la norma IEEE Std. 80.....	20
3.3.	Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo	21
3.4.	Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas	22
3.5.	Tratamiento del suelo para obtener resistividad más baja.....	23
3.6.	Cálculo de la tensión máxima de la malla.....	23
3.7.	Cálculo de la tensión real de paso E_p	25
3.8.	Refinamiento del diseño preliminar	25
3.9.	Conexiones a la malla	27
3.10.	Procedimiento de diseño	28
4.	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES TIPO GIS	29



4.1. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO	31
4.2. CALIBRE DEL CONDUCTOR	33
4.3. CORRIENTE A DISIPAR	33
4.4. DISEÑO DE MALLA DE TIERRA.....	35
4.5. DATOS DE EVALUACIÓN	35
4.6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	36
4.6.1. RUTA Nº1 DE EVALUACIÓN.....	37
4.6.2. RUTA Nº2 DE EVALUACIÓN.....	39
4.6.3. RUTA Nº3 DE EVALUACIÓN.....	40
4.7. SUPERFICIE DE TENSIÓN DE TOQUE	42
4.8. ESPECIFICACIONES PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	43
4.8.1. EXCAVACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LA RED	43
4.8.2. CABLES	43
4.8.3. EMPALMES.....	43
4.8.4. ELECTRODOS DE TIERRA (VARILLAS).....	43
4.8.5. CONDICIONES DE INSTALACIÓN	44
5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	44



1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo intenta presentar de manera simple, los aspectos fundamentales sobre el diseño seguro de la malla de tierra de subestaciones de alta tensión ya sean de tipo convencional o de tipo encapsuladas basados en los conceptos tratados en la norma IEEE Std. 80 (2000). Así mismo exponer los aspectos más relevantes que componen un sistema de puesta a tierra y los criterios de selección según su uso más adecuado y eficiente.

Mediante los conceptos desarrollados en este texto, pretendemos recordar cómo se debe calcular un sistema de puesta a tierra, comenzando con la obtención de los datos de campo, continuando con el diseño propiamente dicho y finalizando con la medición de la resistencia de un sistema de puesta a tierra ya construido.

La malla o red de conexión a tierra suministra la adecuada protección al personal y al equipo que tanto dentro como fuera de la subestación, pueden quedar expuestos a tensiones peligrosas cuando se presentan fallas a tierra en la instalación.

Precisar el modelo y la medición del sistema de puesta a tierra en una subestación es de vital importancia para garantizar la operación del sistema. Para ello se debe tener claridad de los materiales que se deben usar para el un funcionamiento adecuado y eficiente del sistema.



1.1. FUNCIONES DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA

- Proteger a los individuos, limitando las tensiones de toque y de paso a tensiones aceptables en todas las zonas de las instalaciones durante condiciones de falla.
- Proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica en la tierra bajo condiciones normales o de cortocircuito, sin exceder ningún tipo de límite operacional de los equipos o afectar adversamente la continuidad del servicio.
- Asegurar el buen funcionamiento de los equipos de protección de una red, lo cual garantizará el adecuado aislamiento de las partes de dicha red que estén siendo afectadas por la falla.
- Minimizar la interferencia de los circuitos de transmisión y distribución sobre los sistemas de comunicaciones y control.
- Mantener ciertos puntos de una red a un nivel de potencial definido con referencia a la tierra.
- Impedir que los soportes de los equipos alcancen un nivel de potencial diferente al de la tierra.
- Evitar las descargas eléctricas estáticas en atmósferas explosivas.
- Proteger la red contra los efectos de las descargas atmosféricas.
- Permitir la utilización de la tierra como camino de retorno en la transmisión de energía en corriente continua.

El procedimiento de diseño que se describe corresponde a la Standard 80-2000 de la IEEE y permite obtener niveles seguros de tensiones de paso y de toque dentro de la subestación (área cercada) y en sus proximidades. Puesto que la tensión de malla representa la peor tensión de toque posible dentro de la subestación (excluyendo los potenciales transferidos), esta clase de tensión se usará como base para el diseño.

Las tensiones de paso son menos peligrosas que las tensiones de malla debido a que se debe instalar una capa superficial de alta resistividad, pero esta capa no se extiende por fuera de la subestación, donde las tensiones de paso pueden ser peligrosas. En cualquier caso, las tensiones de paso y de toque calculadas deben ser menores que las tensiones de paso y de toque tolerables por el cuerpo humano.

Para mallas de puesta a tierra igualmente espaciadas, la tensión de malla se incrementará a lo largo de las cuadrículas desde el centro hasta las esquinas de la malla, lo cual dependerá de su tamaño, del número y localización de las varillas de tierra, del espaciamiento de los conductores paralelos, del diámetro y profundidad de los conductores y de la resistividad del suelo.



La tensión de malla (E_m) es la tensión de toque en el centro de una cuadrícula esquinera, pero ésta se disminuye instalando varillas en el perímetro de la malla o cuando el espaciamiento de la malla en el perímetro es pequeño.

Para limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente, y evitar que pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla, debe instalarse un sistema de puesta a tierra. En la discusión que sigue se asume que el sistema de puesta a tierra se compone de una malla horizontal de conductores enterrados, suplementada por varillas de tierra conectadas a la malla con el fin de penetrar suelos de capas profundas que tienen menor resistividad. Dichas varillas se instalan siempre a lo largo del perímetro y en las esquinas de la malla.



2. PRINCIPALES CONSIDERACIONES Y CRITERIOS PARA EL DISEÑO SEGÚN IEEE Std 80

A continuación se presenta una descripción de los criterios de diseño de sistemas de puesta a tierra (SPT) con el algoritmo propuesto en IEEE- 80. Como se ha indicado en el capítulo anterior, un sistema de puesta a tierra debe instalarse para limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente que no pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla.

2.1. Parámetros Críticos

El análisis conceptual de una malla de puesta a tierra usualmente empieza con la inspección de la planta general de la subestación, mostrando los equipos principales y estructuras. Para establecer las ideas básicas y conceptos se deben tener en cuenta ciertos parámetros de los cuales va a depender el dimensionamiento del sistema de puesta a tierra

Los siguientes parámetros, que dependen del sitio de la subestación, tienen un sustancial impacto en el diseño de la malla de puesta a tierra:

2.1.1. Corriente máxima a disipar por la malla (I_G)

El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la malla de la subestación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p$$

Donde:

$I_F = 3I_0 \rightarrow$ Corriente simétrica de falla a tierra en A.

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

$S_f \rightarrow$ Factor de división de corriente.

$C_p \rightarrow$ Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de falla.

2.1.2. Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)

Se debe evaluar el tipo y la localización de la falla a tierra que produzca la circulación de mayor corriente entre la malla de tierra y la tierra circundante y por ende, el más alto GPR y mayor tensión de superficie.



Para determinar el tipo de fallas aplicables se debe dar importancia y consideración a la probabilidad de ocurrencia de la falla. Por tanto es recomendable, por razones prácticas que la evaluación se centre en las fallas línea-línea-tierra y falla línea-tierra:

- a) Falla línea – línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3.I_O = \frac{3.E.Z_2}{Z_1.(Z_O + Z_2) + Z_2.Z_O}$$

- b) Falla línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_F)_{L-T} = 3.I_O = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_O}$$

Donde,

$I_O \rightarrow$ Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A.

$E \rightarrow$ Tensión fase – neutro RMS en V.

$Z_1 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla.

$Z_2 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla.

$Z_0 \rightarrow$ Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla.

En una ubicación dada, una falla simple línea – tierra será la peor si $Z_1.Z_0 > (Z_2)_2$ en el punto de la falla y una falla línea – línea – tierra será la peor si $Z_1.Z_0 < (Z_2)_2$, es común que en un sistema dado $Z_1 = Z_2$.

2.1.3. Factor de decremento (D_f)

En el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-\frac{2.t_f}{T_a}})}$$

Donde:

$t_f \rightarrow$ Duración de la falla en s.

$T_a \rightarrow$ Constante de tiempo de la componente DC.



$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f}$$

X, R → Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación X/R.

2.1.4. Factor de crecimiento (C_p)

Si la malla de puesta a tierra se construye teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación, y no se consideran aumentos futuros de carga ni de alimentadores, $CP = 1$.

2.1.5. Cálculo del factor de división de corriente (S_f)

El proceso del cálculo consiste en derivar una representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. Esto es, conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros, hacia las tierras de los pie de torres que entran y sacan líneas de la subestación. S_f depende de:

- a) Localización de la falla.
- b) Magnitud de la resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación.
- c) Cables y tubos enterrados en las vecindades de la subestación o directamente conectados al sistema de puesta a tierra.
- d) Cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno por tierra.
- e) Líneas de transmisión que entran y alimentadores que salen de la subestación; cantidad, número de cables de guarda y la impedancia de cada uno; cantidad y resistencia de puestas a tierra de pies de torre; longitud de líneas de transmisión y alimentadores; material y calibre de cables de guarda y neutros.

Existe una serie de desarrollos matemáticos, curvas y tablas que permiten encontrar el valor de S_f pero resulta mucho más práctico utilizar la tabla que se presenta a continuación.

La Tabla 1. muestra las impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de transmisión y de neutros de alimentadores de distribución, para una contribución remota del 100% con X líneas de transmisión y Y alimentadores de distribución. La primera columna muestra las impedancias equivalentes para resistencias de electrodos de puesta a tierra de líneas de transmisión R_{tg} de 15Ω y resistencias de electrodos de puesta a tierra



de alimentadores de distribución R_{dg} de 25Ω . La segunda columna de impedancias equivalentes corresponde a $R_{tg} = 100\Omega$ y $R_{dg} = 200\Omega$.

El factor de división de corriente será entonces:

$$(S_f)_{X/Y} = \left| \frac{(Z_{eq})_{X/Y}}{R_g + (Z_{eq})_{X/Y}} \right|$$

Donde: $(Z_{eq})_{X/Y} \rightarrow$ impedancia equivalente de X cables de guarda de líneas de transmisión e Y neutros de alimentadores de distribución.

$R_g \rightarrow$ resistencia del sistema de puesta a tierra de la subestación.

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Z_{eq} (ohms) $R_{tg}=15, R_{dg}=25$	Z_{eq} (ohms) $R_{tg}=100, R_{dg}=200$
1	1	$0,91 + j0,485$	$3,27 + j0,652$
1	2	$0,54 + j0,33$	$2,18 + j0,412$
1	4	$0,295 + j0,20$	$1,32 + j0,244$
1	8	$0,15 + j0,11$	$0,732 + j0,133$
1	12	$0,10 + j0,076$	$0,507 + j0,091$
1	16	$0,079 + j0,057$	$0,387 + j0,069$
2	1	$0,685 + j0,302$	$2,18 + j0,442$
2	2	$0,455 + j0,241$	$1,63 + j0,324$
2	4	$0,27 + j0,165$	$1,09 + j0,208$
2	8	$0,15 + j0,10$	$0,685 + j0,122$
2	12	$0,10 + j0,07$	$0,47 + j0,087$
2	16	$0,08 + j0,055$	$0,366 + j0,067$
4	1	$0,45 + j0,16$	$1,30 + j0,273$
4	2	$0,34 + j0,15$	$1,09 + j0,22$
4	4	$0,23 + j0,12$	$0,817 + j0,16$
4	8	$0,134 + j0,083$	$0,546 + j0,103$
4	12	$0,095 + j0,061$	$0,41 + j0,077$
4	16	$0,073 + j0,05$	$0,329 + j0,06$
8	1	$0,27 + j0,08$	$0,72 + j0,152$
8	2	$0,23 + j0,08$	$0,65 + j0,134$
8	4	$0,17 + j0,076$	$0,543 + j0,11$
8	8	$0,114 + j0,061$	$0,408 + j0,079$
8	12	$0,085 + j0,049$	$0,327 + j0,064$
8	16	$0,067 + j0,041$	$0,273 + j0,052$

Tabla 1. Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (alimentadores)



2.1.6. Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s)

La duración de la falla y la duración del choque normalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choques sucesivos, como los producidos por los re-cierres automáticos de los reclosers. La selección de t_f puede reflejar tiempos de despeje rápidos de la subestación de transmisión y tiempos de despeje lentos para subestaciones de distribución e industriales. La selección de t_f y t_s puede resultar en la combinación más pesimista de factores de decremento de corrientes de falla y corrientes permitidas por el cuerpo humano. Valores típicos para t_f y t_s están en el rango de **0.25 s a 1 s**.

2.2. Geometría de la malla

Las limitaciones de los parámetros físicos de una malla de puesta a tierra están basadas en las restricciones físicas y económicas de la misma. Es poco práctico instalar una placa de cobre como sistema de puesta a tierra.

- Los espaciamientos típicos entre conductores (D) están en el rango: $15\text{m} > D > 3\text{m}$
- Las profundidades típicas (h) están en el rango: $1.5\text{m} > h \geq 0.5\text{ m}$
- Los calibres típicos de conductores (ACM) están en el rango: $500\text{ MCM} > \text{ACM} \geq 2/0\text{ AWG}$
- El diámetro del conductor de la malla tiene un efecto despreciable sobre la tensión de malla.
- El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia de malla (R_g). Entre mayor sea A, menor será R_g y por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR).

2.3. Resistividad de la capa superficial (ρ_s)

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo. Una capa superficial con un espesor (h_s) entre $0.15\text{m} \geq h_s \geq 0.1\text{m}$ de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla, y del espesor y material de la capa superficial.



La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad del orden de $5000 \Omega\cdot\text{m} > \rho_s > 2000 \Omega\cdot\text{m}$. Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m, disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

Se introduce aquí el factor de disminución de la capa superficial (C_s), que puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de C_s ; sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de C_s . Este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09}$$

Donde,

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno ($\Omega\cdot\text{m}$).

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad de la capa superficial ($\Omega\cdot\text{m}$).

$h_s \rightarrow$ Espesor de la capa superficial.

2.4. Resistividad del terreno (ρ)

La resistencia de la malla y los gradientes de tensión dentro de una subestación están directamente relacionados con la resistividad del terreno, lo cual variará horizontal y verticalmente. Se deben reunir suficientes datos relacionados con el patio de la subestación, con base en mediciones directas de resistividad empleando un telurómetro. La resistividad del terreno es directamente afectada por la humedad, la temperatura ambiente y el contenido de químicos.

Las investigaciones sobre resistividad del terreno de una subestación son esenciales para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de las muestras de excavaciones, perforaciones y otras investigaciones geológicas, proporcionan información útil sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del suelo, y dan una idea sobre el rango de resistividad del terreno del sitio. La Tabla 2 muestra el rango de resistividades de suelos típicos.



<i>Tipo De Suelo</i>	<i>Resistividad [$\Omega \cdot m$]</i>
Pirita, galena, magnetita	0,000001-0,01
Agua de mar	1
Suelo orgánico	1-50
Arcilla	1-100
Esquisto (roca foliada)	10-100
Arena o grava	50-1000
Arcenisca	20-2000
Piedra caliza, colcita, dolomita	5-10000
Cascajo (75% de piedras de 2cm)	3000
Cuarzo, granito, neis	1000-10000

Tabla 2. Resistividad típica de los suelos

2.5. Medidas de resistividad

Los estimativos basados en la clasificación del suelo ofrecen sólo una aproximación de la resistividad; por tanto, las pruebas reales son imperativas. Éstas deben hacerse en muchos lugares dentro del área de la subestación. Rara vez se encuentran sitios de la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda el área completa y a profundidades considerables. Típicamente existen varias capas y cada una tiene una resistividad diferente. Con frecuencia ocurren cambios laterales, y en comparación con los verticales esos cambios son más grandes. Las pruebas de resistividad del suelo deben hacerse para determinar si existen variaciones importantes de la resistividad con la profundidad.

El número de medidas tomadas debe ser más grande donde las variaciones son mayores, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad. Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable usar un rango incrementado de espaciamientos de prueba para obtener un estimativo de la resistividad de capas más profundas.

El método de Wenner o de los cuatro electrodos, mostrado en la Ilustración 1, es la técnica más comúnmente usada.

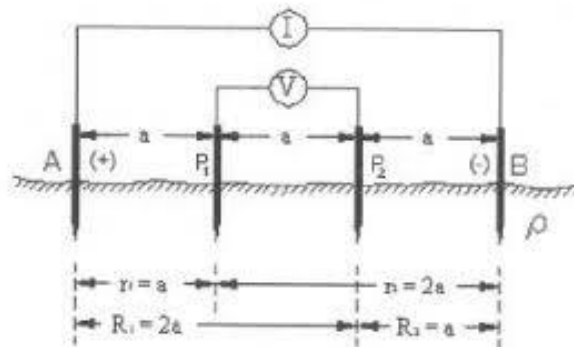


Ilustración 1. Método de Wenner – Cuatro electrodos.



Los cuatro electrodos son clavados en la tierra en línea recta a una profundidad “b”, separados a una distancia “a”. La tensión entre los dos terminales interiores (o de potencial) es luego medido y dividido por la corriente entre los dos terminales exteriores (o de corriente) para dar el valor de la resistencia R, que aparece indicada en el telurómetro. Luego se aplica la siguiente fórmula:

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

Donde:

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente del suelo (Ω -m).

$R \rightarrow$ Resistencia medida en Ω .

$a \rightarrow$ Distancia entre electrodos adyacentes en m.

$b \rightarrow$ Profundidad de los electrodos en m.

Si $b \ll a$, como es el caso más común:

$$\rho_a = 2\pi a R$$

Las ecuaciones anteriores se pueden usar para determinar la resistividad aparente ρ_a a una profundidad a.

2.6. Interpretación de las medidas de resistividad del suelo

El objetivo fundamental de las mediciones es encontrar un modelo de suelo que ofrezca una buena aproximación del suelo real. La resistividad varía lateralmente y con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del terreno. Las condiciones climáticas influyen en la resistividad medida, razón por la cual, dichas mediciones deben realizarse, en lo posible, en época de verano prolongado para obtener la resistividad más alta y desfavorable.

Los modelos más usados comúnmente para la resistividad del suelo son:

a) Modelo de suelo uniforme:

Usado sólo cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que raramente ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto.

Cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se puede usar un valor promedio para la resistividad del suelo, como una primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad



aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del patio, así:

$$\rho_{a\text{ prom}} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n}$$

Donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an} \rightarrow$ Resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamientos siguiendo el método de Wenner.

$n \rightarrow$ Número total de medidas tomadas.

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente.

En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30%.

b) Modelo de suelo de dos capas:

Es una representación muy exacta de las condiciones reales del suelo, y consiste en una capa superior de profundidad finita y con resistividad diferente a la de la capa más baja de espesor infinito.

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión K , definido como:

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

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega\cdot\text{m}$.

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en $\Omega\cdot\text{m}$.

En muchos casos, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema seguro de puesta a tierra. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde.



La gráfica de la Ilustración 2 está basada en los datos de prueba de Wenner.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de Sunde, como se menciona a continuación:

- Dibujar el gráfico ρ_a vs. a .
- De la gráfica anterior se estiman ρ_1 y ρ_2 , extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad, si los datos de campo son insuficientes.
- Determinar ρ_2/ρ_1 y seleccionar una curva del gráfico de la Ilustración 2, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- Seleccionar el valor de ρ_a/ρ_1 sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada.
- Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_a/ρ_1 por ρ_1 .
- Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs. a .
- Calcular la profundidad del nivel superior H usando la separación de prueba apropiada a.

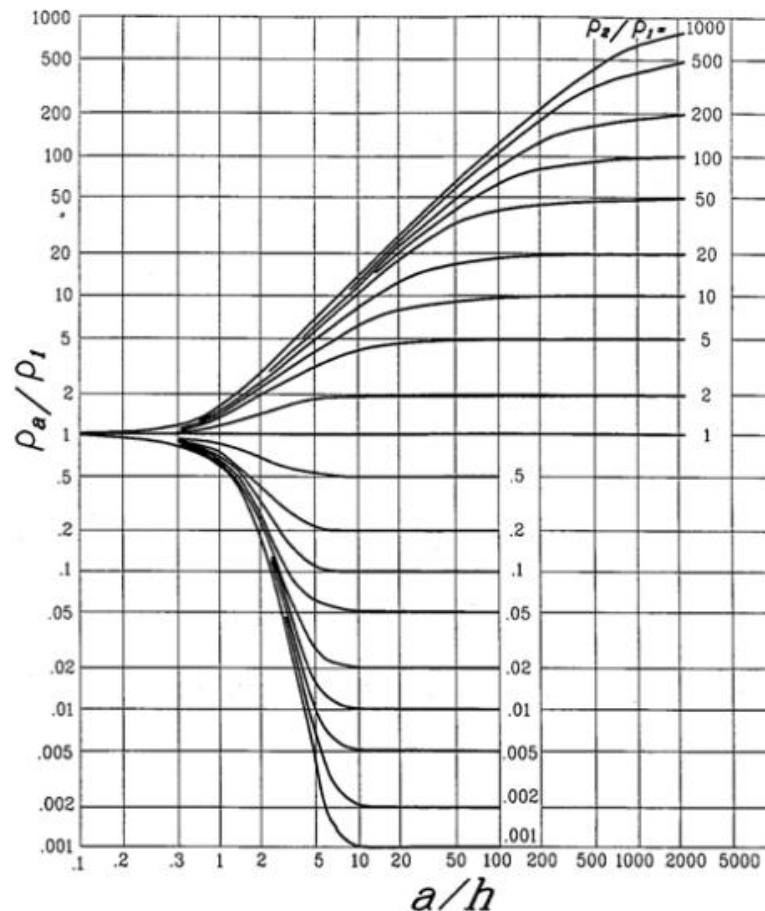


Ilustración 2. Curvas de Sunde.



2.7. Selección del tamaño del conductor

La elevación de temperatura de corto tiempo en un conductor de tierra, o el tamaño requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor, se encuentra mediante la ecuación:

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde,

$I_F \rightarrow$ Corriente asimétrica de falla RMS en kA, se usa la más elevada encontrada.

$A_{MCM} \rightarrow$ Área del conductor en MCM.

$T_m \rightarrow$ Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión en °C.

$T_a \rightarrow$ Temperatura ambiente en °C.

$T_r \rightarrow$ Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

$\alpha_0 \rightarrow$ Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C.

$\alpha_r \rightarrow$ Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r 1/°C.

$\rho_r \rightarrow$ Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r $\mu\Omega$ -cm.

$K_0 \rightarrow 1/\alpha_0$ o $[(1/\alpha_0) - T_r]$ en °C.

$t_c \rightarrow$ Duración de la corriente en seg.

$TCAP \rightarrow$ Capacidad térmica por unidad de volumen en J / (cm³*°C).

La Tabla 3 proporciona los datos para las constantes α_r , K_0 , T_m , ρ_r , y TCAP.

La fórmula simplificada da una aproximación muy buena:

$$A_{MCM} = I_F * K_f * \sqrt{t_c}$$

Donde:

$K_f \rightarrow$ Constante para el material dado en la Tabla 3, usando una $T_a = 40$ °C.

El tamaño del conductor realmente seleccionado es usualmente más grande que el que se basa en la fusión, debido a factores como:

- El conductor debe resistir los esfuerzos mecánicos esperados y la corrosión durante la vida útil de la instalación.
- El conductor debe tener alta conductancia para prevenir caídas de tensión peligrosas durante una falla.
- La necesidad de limitar la temperatura del conductor.
- Debe aplicarse un factor de seguridad a la instalación de puesta a tierra y a los demás componentes eléctricos.



Se acostumbra entonces emplear como calibre mínimo el N° 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión. La Tabla 4 muestra las dimensiones típicas de los conductores empleados para el sistema de puesta a tierra.

DESCRIPTION	Material conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (0°C)	Fusing temperature T_m	ρ_r 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP thermal capacity [$\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$]	Kf
Copper, annealed soft-drawn	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42	7
Copper, commercial hard-drawn	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42	7,06
Cooper-clad steel wire	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85	10,45
Cooper-clad steel wire	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85	12,06
Cooper-clad steel rod	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85	14,64
Aluminum, EC grade	61	0,00403	228	657	2,86	2,56	12,12
Aluminum, 5005 alloy	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6	12,41
Aluminum, 6201 alloy	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6	12,47
Aluminum-clad steel wire	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58	17,2
Steel, 1020	10,8	0,00316	605	1510	15,9	3,28	15,95
Stainless-clad steel rod	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44	14,72
Zinc-coated steel rod	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93	28,96
Stainless steel, 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03	30,05

Tabla 3. Constantes de los materiales conductores

CALIBRE DEL CONDUCTOR		AREA NOMINAL mm ²	DIAMETRO m
MCM	AWG		
350		177,35	0,015
300		152,01	0,0139
250		126,68	0,0127
211,6	4/0	107,22	0,0117
167,8	3/0	85,03	0,0104
133,1	2/0	67,44	0,0093

Tabla 4. Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra

2.8. Criterio de tensiones de paso y de toque tolerables

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbidas por el cuerpo humano, antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. Los voltajes máximos tolerables por un cuerpo humano de 50 kg. de peso corporal, durante un circuito accidental no debe exceder los siguientes límites:

- Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de 50 kg. de peso corporal:

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

- Tensión de toque límite tolerable por un cuerpo de 50 kg. de peso corporal:

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

Donde:

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad del material de la capa superficial en Ω -m.

$R_B = 1000\Omega \rightarrow$ Resistencia promedio del cuerpo humano.

$I_B =$ Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo $\frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$ (A).

$t_s \rightarrow$ Duración del choque (s).

$6C_s \rho_s = 2R_f \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1m en serie sobre la capa superficial.

$1.5C_s \rho_s = R_f/2 \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies juntos en serie sobre la capa superficial.

$R_B = \rho/4b \rightarrow$ Resistencia a tierra de un disco metálico de radio b (b = 0.08 m) .. sobre la superficie de una malla homogénea de resistividad p.

Las tensiones de paso y de toque reales deben ser menores que los respectivos límites máximos permisibles (o tolerables) para obtener seguridad.



3. EVALUACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Un sistema de tierra ideal debe tener una resistencia con respecto a la tierra remota aproximadamente cero. En la práctica el GPR en la subestación se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla; mientras mas grande sea la corriente, menor debe ser el valor de la resistencia total del sistema.

3.1. Especificaciones requeridas

La principal función de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas. Esta es una consideración muy importante durante el diseño y obliga a que se fije una resistencia objetivo. Por lo tanto, los valores recomendados en la Tabla 5 surgen de la experiencia, sin que necesariamente obedezcan a una norma específica.

UTILIZADA PARA	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra Ω
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión $V \geq 115KV$	1
Subestaciones de media tensión de uso exterior en poste	10
Subestaciones de media tensión de uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

Tabla 5. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

3.2. Método simplificado de la norma IEEE Std. 80

La formula básica para determinar la resistencia de tierra de la subestación es:

$$R_g = \frac{\rho}{4} * \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} [\Omega]$$

Donde:

R_g : Resistencia de tierra de la subestación en Ω

ρ : Resistividad promedio de terreno en $\Omega \cdot m$

A : Área de ocupación de la malla de tierra en m^2

L : Longitud total de conductores enterrados incluyendo los metros lineales de varillas en m



La anterior ecuación es razonablemente precisa para profundidades de la malla de aproximadamente 0.25m. Para profundidades de malla entre 0.25m y 2.5m se debe incluir una corrección por la profundidad, de lo cual resulta la formula de Sverak.

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

Donde:

$L_T \rightarrow$ Longitud total de conductores enterrados en m.

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno Ω -m.

$A \rightarrow$ Área ocupada por la malla de tierra m².

$H \rightarrow$ Profundidad de la malla en m.

Para mallas sin varillas de tierra, esta fórmula ha sido probada y da resultados que son prácticamente idénticos a los obtenidos con la fórmula de Schwarz.

3.3. Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo

Schwarz desarrolló el siguiente conjunto de ecuaciones para determinar la resistencia de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo que consta de una malla horizontal con electrodos verticales (varillas). Schwarz empleó la siguiente ecuación para cambiar la resistencia de la malla, varillas y la resistencia mutua, para calcular la resistencia de puesta a tierra R_g :

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

Donde,

$R_1 \rightarrow$ Resistencia de tierra de los conductores de la malla en Ω .

$R_2 \rightarrow$ Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en Ω .

$R_m \rightarrow$ Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_1 y el grupo de varillas de tierra R_2 , en Ω .

La resistencia de tierra de la malla está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{d_c h}} \right) - \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

Donde:



$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68$$

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega\cdot\text{m}$.

$L_c \rightarrow$ Longitud total de todos los conductores de la malla en m.

$h \rightarrow$ Profundidad de los conductores de la malla en m.

$d_c \rightarrow$ Diámetro del conductor de la malla en m.

$A \rightarrow$ Área cubierta por los conductores de la malla de tierra m^2 .

$L_x, L_y \rightarrow$ Largo, ancho de la malla en m.

La resistencia de las varillas de tierra está dada por:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

Donde:

$n_r \rightarrow$ Número de varillas de tierra.

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla en m.

$d_r \rightarrow$ Diámetro de la varilla en m.

La resistencia de tierra mutua entre la malla y las varillas está dada por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

La resistencia combinada de R_1 y R_2 será menor que la resistencia a tierra, analizando ambos componentes por sí solos; pero será más alta que la de la combinación en paralelo ($R_m < R_1$, $R_m < R_2$, $R_g > R_m$).

3.4. Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas

En la práctica, es deseable enterrar varillas de tierra profundas para alcanzar suelos de menor resistividad. En las ecuaciones que siguen, las expresiones para R_1 , R_2 y R_m se han modificado, para tener en cuenta esta situación.

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{d_c h}} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_2} \right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad \rho_a = \frac{L_r \rho_1 \rho_2}{\rho_2 (H - h) + \rho_1 (L_r + h - H)}$$



Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega\cdot m$.

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa profunda en $\Omega\cdot m$.

$H \rightarrow$ Espesor de la capa superior (valor encontrado por método de Sunde).

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla en m.

$L_r \rightarrow$ Longitud de las varillas (c/u).

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente en $\Omega\cdot m$.

Si $\rho_2 \leq 0.2 \rho_1$ y $H \geq 0.1 L_x$, las anteriores ecuaciones son razonablemente exactas para la mayor parte de los cálculos prácticos.

3.5. Tratamiento del suelo para obtener resistividad más baja

Con frecuencia, es imposible obtener la reducción deseada de resistencia de tierra agregando más conductores o más varillas de tierra a la malla. Una solución alternativa es incrementar de manera efectiva el diámetro de los electrodos, modificando el suelo alrededor del electrodo. Los métodos más conocidos son los siguientes:

- a) El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene montmorillonita, que se formó por acción volcánica hace mucho tiempo, y es un elemento no corrosivo, estable y tiene una resistividad de $2.5 \Omega\cdot m$ al 300% de humedad. Es de naturaleza higroscópica.
- b) El uso de sales como cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio, para incrementar la conductividad del suelo alrededor del electrodo. Pero estas sales emigran a otras áreas.
- c) El uso de electrodos de tipo químico que constan de un tubo de cobre relleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten la entrada de humedad, disolver las sales y permitir que la solución de sal se filtre en la tierra.
- d) Materiales artificiales de tierra, de baja resistividad colocados alrededor de las varillas y de los conductores en la zanja. En Colombia se conocen como Hidrosolta y Fabigel.
- e) Electrodos revestidos de concreto, donde el concreto por ser un material higroscópico y que atrae la humedad, al ser enterrado en el suelo se comporta como un semiconductor mediano con resistividades de 30 a $90 \Omega\cdot m$, pero facilita la corrosión.

3.6. Cálculo de la tensión máxima de la malla

El valor de la tensión real de la malla se obtiene mediante la expresión:

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



Donde:

$K_m \rightarrow$ Valor geométrico de espaciamento de la malla, calculado así:

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

Donde:

K_h es un factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla, dado por:

$$K_h = \sqrt{1+h/h_0} \quad \text{con } h_0 = 1\text{ m}$$

K_i es el factor de irregularidad y se define como:

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

K_{ii} es un factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores sobre la esquina de la malla. Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro, o para mallas con varias varillas de tierra en las esquinas, para ambas, $K_{ii} = 1$.

Para mallas sin varillas de tierra, o sólo unas pocas, ninguna localizada en las esquinas o sobre el período:

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

n representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente, y está dado por:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} ; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} ; n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7A/L_x \cdot L_y} ; n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

- Para mallas cuadradas: $n = n_a$ ya que $n_b = n_c = n_d = 1$
- Para mallas rectangulares: $n = n_a \cdot n_b$ ya que $n_c = n_d = 1$
- Para mallas en forma de L: $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c$ ya que $n_d = 1$

Donde:

$L_c \rightarrow$ Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m.

$L_p \rightarrow$ Longitud del perímetro de la malla en m.

$L_x \rightarrow$ Longitud máxima de la malla en la dirección X, en m.

$L_y \rightarrow$ Longitud máxima de la malla en la dirección Y, en m.

$D_m \rightarrow$ Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla, en m.

Para mallas sin varillas de tierra o para mallas con sólo unas pocas varillas esparcidas a través de la malla pero ninguna localizada en las esquinas o a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

$$L_M = L_c + L_R$$



Donde:

$L_R = n_r L_r \rightarrow$ Longitud total de todas las varillas

$n_r \rightarrow$ Numero de varillas.

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla.

Para mallas con muchas varillas de tierra en las esquinas, así como a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R$$

3.7. Cálculo de la tensión real de paso E_p

El valor de tensión real de paso se calcula mediante:

$$E_p = \frac{\rho I_G K_S K_i}{L_S}$$

Para mallas con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado L_S es:

$$L_S = 0.75 L_C + 0.85 L_R$$

Se asume que el E_p máximo ocurre sobre una distancia de 1m hacia fuera del conductor perimetral en el ángulo que bisecta la esquina más extrema de la malla.

El valor de K_S se calcula si:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

Esta ecuación es válida para profundidades de enterramiento de $0.25\text{m} < h < 2.5\text{m}$.

3.8. Refinamiento del diseño preliminar

Si los cálculos basados en el diseño preliminar (Ilustración 3) indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas dentro de la subestación, se deben estudiar diferentes alternativas de selección y aplicarlas donde sea adecuado.



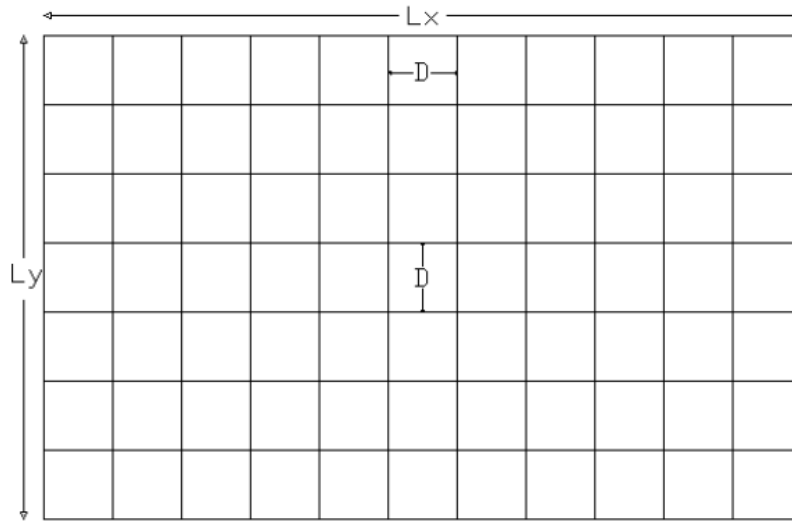


Ilustración 3. Diseño preliminar de la malla

$$L_c = NL_x + ML_y ; A = L_x \cdot L_y$$

Donde:

N → Número de conductores de longitud L_x .

M → Número de conductores de longitud L_y .

Posibles remedios o alternativas de solución:

a) Disminuir la resistencia total de la malla:

Al disminuir R_g se disminuye el GPR y por lo tanto el voltaje máximo transferido. Esto se puede lograr aumentando el área total de la malla (A), enterrando varillas de puesta a tierra, que penetren en capas de más baja resistividad.

b) Disminuir o ajustar los espaciamientos de los conductores de la malla (D):

Además de disminuir el espaciamiento D (lo cual aumenta la cantidad de conductor a enterrar) también se puede pensar en extender el conductor de la malla por fuera de la cerca, incrementar la cantidad de varillas perimetrales, enterrar dos o más conductores paralelos a lo largo del perímetro, aumentar la profundidad de la malla y disminuir el espaciamiento cerca al perímetro de la malla.

c) Derivar una porción más grande de la corriente de falla hacia otras trayectorias:

Esto se puede lograr disminuyendo la resistencia de puesta a tierra de las torres vecinas a la subestación. Esto también significa trasladar el problema a las torres de transmisión y distribución, donde no hay control de acceso.

d) Limitando la corriente total de falla

Colocando barreras para limitar el acceso a algunas áreas



e) Instalando mallas equipotenciales:

Hacerlo debajo de la capa de roca triturada y en los sitios donde las cuadrillas se ubican con más frecuencia. Las mallas equipotenciales se conectan a la malla principal y a la estructura metálica del equipo que está justo encima de ella (seccionadores, interruptores, etc). Las mallas equipotenciales se pueden construir en cable de cobre N° 6 AWG con espaciamientos de 0.6m.

3.9. Conexiones a la malla

Se deben emplear conductores con la capacidad adecuada de corriente y resistencia mecánica suficiente para la conexión entre:

1. Todos los electrodos de tierra, como mallas de puesta a tierra, varillas, pozos de tierra o donde se apliquen partes metálicas, tubos de agua o de gas, cajas para pozos de agua, etc.
2. Todas las partes conductivas que pueden accidentalmente llegar a energizarse, como estructuras metálicas, armazones de máquinas, alojamientos a cabinas metálicas de equipos de interrupción convencionales o aislados a gas, tanques de transformadores, cables de guarda, etc. Igualmente, partes metálicas que pueden llegar a tener diferencias relativas de potencial con otras partes metálicas y que deben tener enlaces con la malla de tierra.
3. Todas las fuentes de corriente, como pararrayos, bancos de capacitores o capacitores de acople, transformadores y, donde sea adecuado, los neutros de las máquinas y circuitos de potencia.
4. Debe conectarse a la malla el acero de refuerzo de las obras civiles, rieles para movilización de transformadores, tuberías de agua potable y bandejas portacables.
5. Las ventanas, puertas, pasamanos, tableros, etc, del edificio de control también deben conectarse a tierra, lo mismo que las instalaciones de baja tensión. Cables o correas de cobre se emplean usualmente para las conexiones a tierra. Algunas veces los tanques de transformadores son usados como parte de la trayectoria de tierra de los pararrayos. Así mismo, la mayor parte de las estructuras de acero y de aluminio también se usa como parte de la trayectoria a tierra, si se establece que su conductancia -incluidas las de las conexiones- es la adecuada.

Se deben también aterrizar las manijas de los seccionadores mediante una malla de seguridad bajo la capa de roca triturada, justo debajo de la manija y enlazada con la estructura metálica. También se acostumbra colocar a tierra las mallas perimetrales y la puerta de acceso mediante enlaces flexibles conectados a la cerca.



Las pantallas y forros metálicos del cableado de control se deben aterrizar en un sólo punto al igual que las bandejas y escalerillas portacables.

3.10. Procedimiento de diseño

Los pasos a ejecutar durante el diseño de mallas de puestas a tierra para una subestación son los siguientes:

Paso 1: El mapa adecuado y plano de la localización general de la subestación proporciona un buen estimativo del área para la malla. Las medidas de resistividad determinan la curva de resistividad y los datos para modelar el terreno (suelo uniforme o suelo de dos capas), A, ρ .

Paso 2: Determinar el tamaño del conductor de la malla. La corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima esperada en el futuro y que será conducida por cualquier conductor en el sistema de puesta a tierra, y el tiempo t_c debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible (incluyendo el respaldo). $A_{MCM}, t_c, d, 3I_0$.

Paso 3: Determinar las tensiones tolerables de toque y de paso para personas con peso corporal de 50 kg. La selección de tiempo t_s está basado en el juicio del ingeniero diseñador. E_{t50} y E_{p50} .

Paso 4: El diseño preliminar debe incluir un anillo conductor que abarque toda el área de la puesta a tierra, más los conductores adecuados de cruce, con el fin de proporcionar el acceso conveniente de las bajantes a tierra de los equipos, etc. Los estimativos iniciales del espaciamiento de conductores y la localización de las varillas de tierra deben estar basados en la corriente I_G y el área que está siendo aterrizada. D, L_c, L_T, h, L_R, n .

Paso 5: Se calcula la resistencia de puesta a tierra preliminar del sistema en suelo uniforme. Para el diseño final deben hacerse cálculos más exactos, considerando las varillas de tierra si es el caso. R_g, L_c, L_R .

Paso 6: Se determina la corriente I_G a disipar por la malla para evitar un sobredimensionamiento de la malla de puesta a tierra, considerando sólo esa porción de la corriente total de falla $3I_0$ que fluye a través de la malla hacia una tierra remota. La corriente I_G debe reflejar el peor tipo de falla y localización, el factor de decremento y cualquier expansión futura de la subestación. I_G, t_f .

Paso 7: Si el GPR (elevación del potencial de tierra) del diseño preliminar es menor que la tensión tolerable de toque, no es necesario realizar más cálculos. Sólo se requerirá conductor adicional para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos. $I_G R_g < E_{t50}$.

Paso 8: Si no se cumple la condición anterior, se calcula la tensión de malla y la tensión de paso para la malla con suelo uniforme, $E_m, E_s, K_m, K_s, K_i, K_{ii}, K_h$.

Paso 9: Si el voltaje de malla calculado es menor que la tensión tolerable de toque, se requiere completar el diseño. Si la tensión de malla calculada es mayor que la tensión tolerable de toque, el diseño debe ser modificado. $E_m < E_{t50}$.

Paso 10: Si ambas tensiones calculadas de toque y de paso son menores que las tensiones tolerables, el diseño sólo necesita los refinamientos requeridos para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos. Si no, el diseño preliminar debe ser modificado. $E_s < E_{p50}$.



Paso 11: Si se exceden las tensiones tolerables de toque y de paso, es necesaria la revisión del diseño de la malla. Estas revisiones pueden incluir espaciamientos de conductores más pequeños, varillas adicionales de tierra, etc.

Paso 12: Después de satisfacer los requerimientos de tensiones de paso y de toque, se pueden requerir varillas de tierra y malla adicional. Los conductores adicionales de malla se requieren si su diseño no incluye conductores cerca de los equipos a ser puestos a tierra. Se pueden requerir varillas adicionales en la base de los pararrayos, neutros de transformadores, etc. El diseño final también será revisado para eliminar peligros debido a potenciales transferidos y peligros asociados con áreas de interés especial.

4. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES TIPO GIS

Una subestación tipo GIS (Aislada en gas) utiliza un gas dieléctrico (SF₆), como medio aislante. Los conductores de alta tensión, los seccionadores del interruptor, los interruptores, los transformadores de corriente y los transformadores de voltaje están aislados en gas SF₆ dentro de recintos metálicos conectados a tierra. Una subestación convencional aislada con aire (AIS) requiere cientos de metros de aislamiento de aire para hacer lo que el SF₆ puede hacer en centímetros. Por lo tanto, una subestación GIS puede ser menor que una subestación tipo AIS hasta un factor de 10. Una subestación GIS se utiliza principalmente cuando el espacio es caro o no está disponible. En una subestación GIS las partes activas están protegidas del deterioro de la exposición al aire atmosférico, la humedad, la contaminación, etc. Como resultado, la subestación GIS es más fiable y requiere menos mantenimiento que una AIS.

El gas SF₆ comprimido utilizado como medio aislante en los equipos de conmutación de media y alta tensión ha llevado al desarrollo de la tecnología GIS, cuyas siglas provienen del término “Gas Insulated Substation” (Subestación aislada en gas), teniendo muchas ventajas sobre las subestaciones con aislamiento de aire convencional (AIS – Air Insulated Substation), sin embargo, esta tecnología alternativa ha llevado inevitablemente a un conjunto de problemas por resolver. En el caso de puesta a tierra de la subestación, se puede distinguir tres aspectos principales del diseño de la subestación GIS que necesitan un enfoque diferente de los utilizados en AIS:

El uso de un gas aislante 10 veces mejor que el aire permite diseñar una subestación mucho más compacta. Esto también significa una reducción significativa en el área conectada a tierra de la subestación.

El diseño 'compacto' de estas subestaciones significa que los conductores de fase están mucho más cerca que en una AIS y con envoltentes metálicos para la contención de gas.



Sobre éstos aparecen corrientes inducidas electromagnéticamente que deben drenarse en el sistema de puesta a tierra.

El aislamiento con gas SF6 comprimido facilita pequeños espacios dieléctricos en las subestaciones GIS que ocasionan una ruptura en el rango de nanosegundos. El rápido colapso de la tensión da como resultado la generación de transitorios de onda viajera muy rápidos que se propagan por toda la subestación. El acoplamiento de estos transitorios con el sistema de puesta a tierra provoca un aumento transitorio del potencial de tierra (TGPR).

En la Ilustración 4, se relaciona un esquema donde se pueden identificar las partes principales de una subestación tipo GIS:

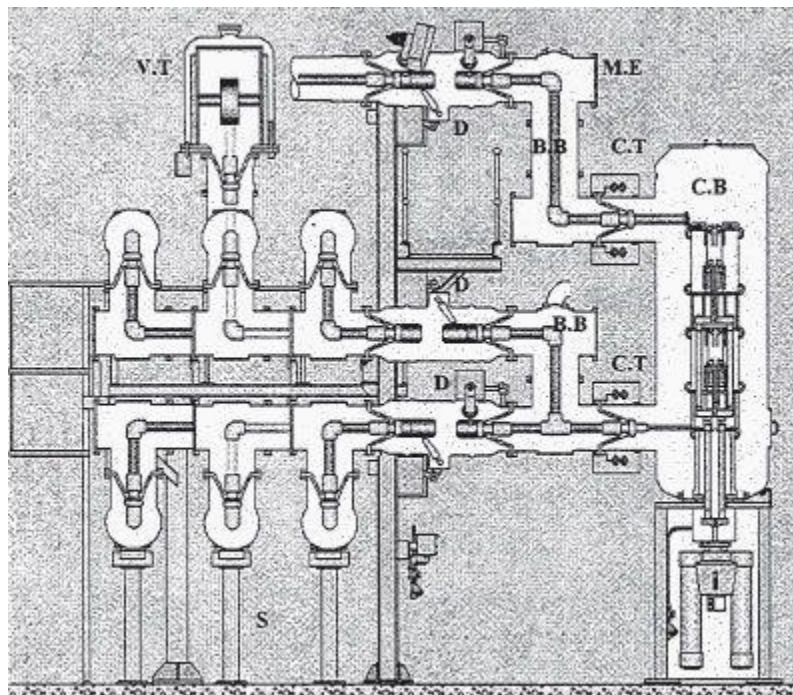


Ilustración 4

- CB: Disyuntor o interruptor
- D: Seccionador
- ME: Gabinete de metal
- BB: Barras de bus
- CT: Transformador de corriente
- VT: Transformador de tensión
- S: Estructuras de acero

Al comienzo de la tecnología GIS, el diseño de conexión a tierra se basaba en el enfoque clásico de limitar los potenciales de la carcasa a niveles seguros basados en las condiciones

máximas de corriente de falla esperadas. A diferencia de estos potenciales relativamente bajos, el arco entre las cajas con conexión a tierra y otros componentes conectados a tierra, son indicativos de potenciales mucho más altos que se observan de manera continua durante la operación normal de un interruptor de la subestación tipo GIS. El propósito de la malla de puesta a tierra es proveer un camino de baja impedancia entre el neutro del sistema y la referencia de tierra. En ocasiones, las subestaciones no cuentan con mallas de tierra apropiadas a la dinámica transitoria presente en la subestación GIS durante operaciones de maniobra. De esta manera, se debe plantear el diseño del sistema de puesta a tierra evaluando su comportamiento ante condiciones del sitio. La metodología se toma de la norma IEEE Std. 80; y se sigue las recomendaciones para el cálculo preliminar de mallas de tierra en plantas y subestaciones eléctricas de la norma IEEE Std. 142. Adicionalmente, se considerarán las normativas aplicables contenidas en el NEC y las obligaciones establecidas en el RETIE para sistemas de puesta a tierra en subestaciones. Como particularidad en las subestaciones GIS es que, por ser subestaciones bridadas, cada segmento debe aterrizararse porque el empaque de la brida actúa como aislante y se pierda la equipotencialidad de las secciones; de esta misma manera, deben equipotencializarse con la carcasa de la subestación todo elemento metálico que haga parte del cuarto de almacenamiento de la subestación como puertas, ventanas, tableros, etc. De tal forma que se tenga una equipotencialidad del 100% de todos los equipos y elementos. La malla del sistema de puesta a tierra se construye en un área diferente a la ubicación física de la subestación porque la subestación requiere de cimientos en concreto que impiden que la malla se construya bajo esta misma superficie, de tal manera que la conexión a la malla se hace a través de platinas superficiales de difícil acceso que llegan finalmente hasta el foso donde se construirá la malla.

A continuación, se muestra un corto procedimiento del dimensionamiento del sistema de puesta a tierra para una subestación tipo GIS llamada FRIASPATA de 220 kV ubicada en Perú propiedad de ISA, con el fin de dar mayor claridad en cada concepto que se muestre en este escrito.

4.1. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Las medidas de resistividad del terreno se toman en campo sobre varios ejes del área donde se planea construir el sistema de puesta a tierra de la subestación. Con las medidas registradas se realiza el cálculo del modelo a ser utilizado en el diseño de la malla de puesta a tierra.

Las medidas de la resistividad del terreno se muestran en la Tabla 6.



Eje	Profundidad [m]					
	1	2	4	6	8	10
	ρ [Ω .m]	ρ [Ω .m]	ρ [Ω .m]	ρ [Ω .m]	ρ [Ω .m]	ρ [Ω .m]
1	629,0	688,0	518,0	71,0	19,8	23,0
2	271,0	280,0	594,0	24,5	25,7	50000,0
3	4240,0	13670,0	50000,0	2990,0	2720,0	677,0
4	472,0	813,0	5620,0	1813,0	2230,0	24840,0
5	144,1	253,0	276,0	285,0	255,0	182,2

Tabla 6. Resistividad aparente medida (Ω .m)

Con base en los datos mostrados en la Tabla 6. para la zona de construcción se obtiene el modelo de dos capas mostrado en la Tabla 7.

DATOS DE SALIDA	
Modelo del suelo	Modelo de 2 capas
Resistividad 1 capa (Ohm-m)	570,32
Resistividad 2 capa (Ohm-m)	22,16
Profundidad primera capa h (m)	1,17

Tabla 7. Resultado del modelo de dos capas de resistividad del terreno (Ω .m)

(Para mayor información sobre el modelo de las 2 capas, consultar el IEEE std 80).

En la Ilustración 5. se presenta la comparación del perfil de resistividad aparente promedio para diferentes profundidades del terreno, considerando las medidas tomadas en el terreno y el modelo de 2 capas.



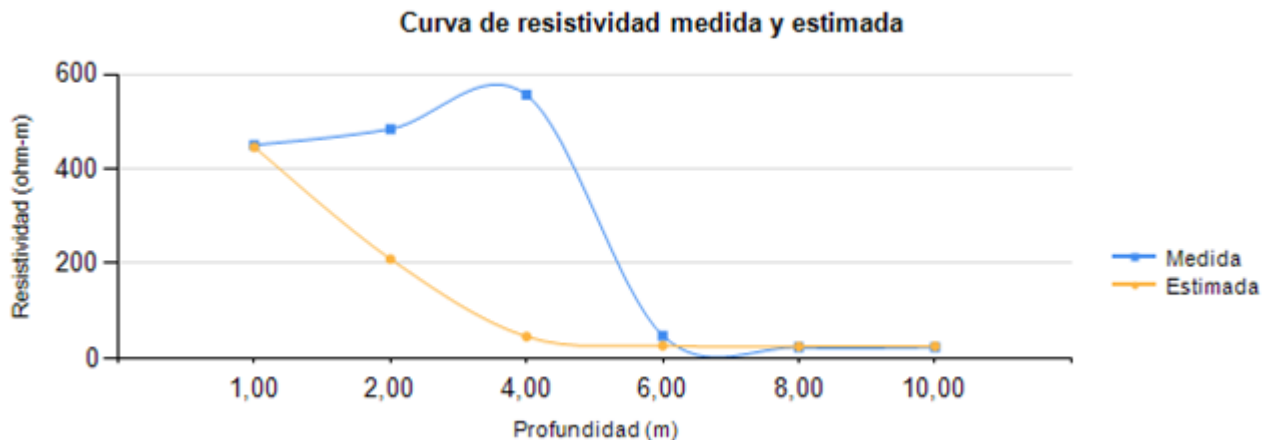


Ilustración 5. Curva de resistividad medida y estimada

4.2. CALIBRE DEL CONDUCTOR

El cálculo se realiza, tomando el criterio de seleccionar corriente de soportabilidad de corta duración de los equipos, que para este caso particular fue de 40 kA, con un tiempo de duración de la falla de corto circuito de 0,5 s (En ESSA se toman 0,35 s, lo que permite hacer mallas menos robustas) y conexiones en soldadura exotérmica.

El diseño determina un conductor de sección de 107 mm^2 , que corresponde a un cable (4/0 AWG) el cual puede soportar una corriente máxima de falla de 43 kA, siendo ésta mayor a la corriente de falla real estimada en la subestación.

4.3. CORRIENTE A DISIPAR

Los parámetros eléctricos para el cálculo de la corriente a disipar por la malla de puesta a tierra se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos de entrada para el cálculo de la corriente a disipar por la red de tierra

DESCRIPCIÓN	DATOS
DATOS DE LA SUBESTACIÓN	
Resistencia de puesta a tierra, R_g [Ω]	0,44
Corriente de falla, I_f [A]	40 000
DATOS DE LAS LÍNEAS	
Número de líneas doble terna en 220 kV que llegan a la subestación	2

DESCRIPCIÓN	DATOS
Número de líneas simple terna en 220 kV futuras que llegarán a la subestación	3
Resistencia de puesta a tierra de las torres, R_t [Ω] (típica)	20
Número de cables de guarda en las torres	2
Número de torres por kilómetro	3
Resistividad del suelo [$\Omega.m$] (promedio típico para la línea)	300
Impedancia del cable de guarda para cada vano (típico) de las líneas doble terna en 220 kV (*)	$2,03 + j0,26$
Impedancia del cable de guarda para cada vano (típico) de las líneas futuras en 220 kV (*)	$0,67 + j0,30$

(*) Estos valores son calculados y dependen de la resistividad del terreno, del número de torres por kilómetro, del número de cables de guarda y de la resistencia de puesta a tierra de las torres de transmisión.

En la Ilustración 6 se muestra el circuito resultante de modelar la malla de puesta a tierra de la subestación Friaspata 220 kV y resistencias en paralelo con las resistencias de puesta a tierra de las torres asociadas a todas las líneas (efecto del cable de guarda).

Donde S_f es el factor de división de corrientes que retorna por la malla y los cables de guarda, y está dado por la formula $S_f = I_g/I_f$, donde I_f es la corriente de falla e I_g es la corriente de falla que circula por la malla de tierra.

Para la distribución de corrientes, se tienen en cuenta las líneas actuales y futuras de 220 kV de la subestación.



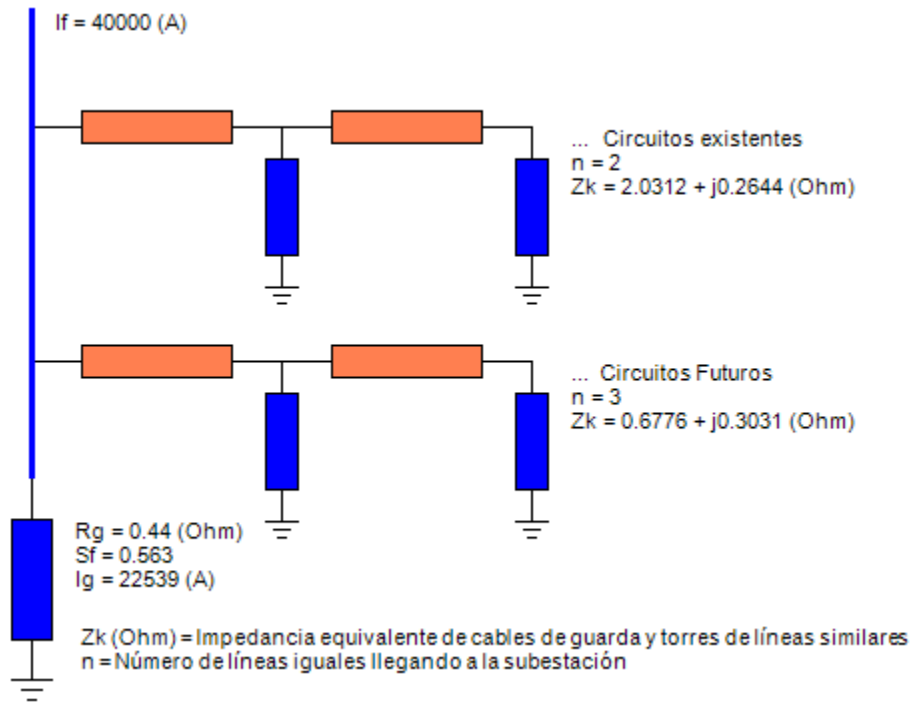


Ilustración 6. Modelo de red equivalente

4.4. DISEÑO DE MALLA DE TIERRA

Empleando la herramienta de cálculo de malla de puesta a tierra (Software HMV Tools, propiedad de HMV Ingenieros) se realizaron simulaciones hasta determinar el espaciamiento de cables óptimos de la malla de tierra de la subestación Friaspata, que cumplan con los requerimientos de tensiones de toque (contacto) y de paso requeridos.

4.5. DATOS DE EVALUACIÓN

Tabla 9. Datos de entrada

DATOS DEL TERRENO	
Modelo del suelo	2 capas
Resistividad capa 1 $\Omega.m$	570,3
Resistividad capa 2 $\Omega.m$	22,6
Profundidad primera capa $h \text{ (m)}$	1,17
Resistividad de la capa de acabado, $\Omega.m$ (típica)	3 000
Espesor de la capa de acabado (según diseño), m	0,10

DATOS DE LA FALLA	
Corriente de falla a tierra para la cual se diseña la malla, A	40 000
Tiempo de duración de la falla, s	0,5
DATOS COMPONENTES DE LA RED	
Calibre del conductor malla de puesta a tierra	107 mm ² (4/0 AWG)
Profundidad de enterramiento malla proyectada del cable (según diseño), m	0,8
Diámetro x longitud de varilla, mm	16 x 2400

4.6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Empleando la herramienta de cálculo de mallas de tierra anteriormente mencionada, se realizaron simulaciones hasta determinar el espaciamiento de cables óptimos, que cumplan con los requerimientos de tensiones de toque (contacto) y de paso.

En la Tabla 10 se presentan los resultados de la evaluación de la red de tierra, y los perfiles de tensión de toque y de paso.

Tabla 10. Resultados obtenidos

DESCRIPCIÓN	VALOR
VARIABLES DE SALIDA	
Resistencia de la red, R_g [Ω]	0,44
Tensión de tierra remota, GPR [V]	9917,16
Corriente que disipa la malla de tierra, I_g [A]	22539
TENSIONES MÁXIMAS SOPORTABLES	
Tensión de toque para 50 kg, [V]	716,7
Tensión de toque para 70 kg, [V]	970

DESCRIPCIÓN	VALOR
Tensión de paso para 50 kg, [V]	2 374,7
Tensión de paso para 70 kg, [V]	3 214,1

En la Ilustración 7 se presenta la configuración de la malla de puesta a tierra recomendada para la subestación Friaspata 220 kV-GIS.

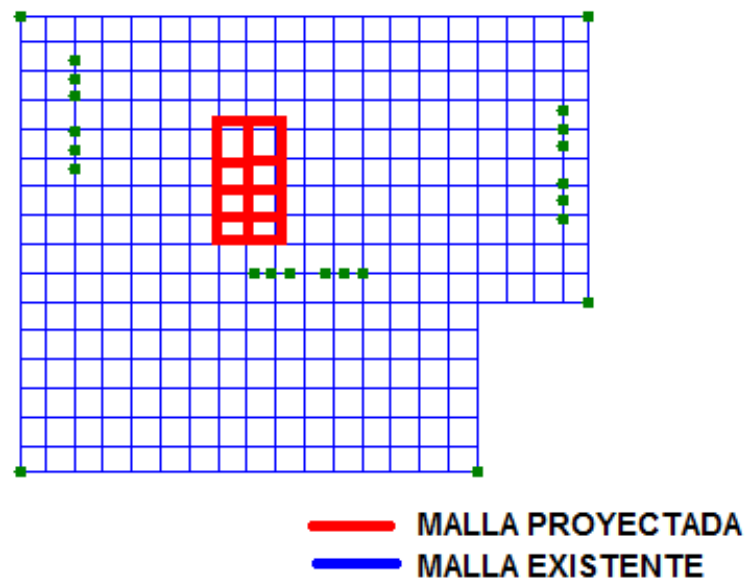


Ilustración 7. Disposición física malla de puesta a tierra

4.6.1. RUTA N°1 DE EVALUACIÓN

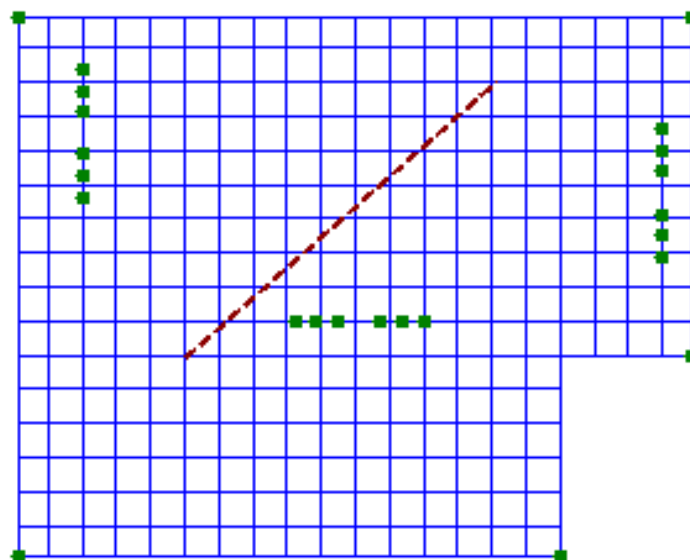


Ilustración 8. Ruta N°1 de evaluación de la tensión de toque y paso.



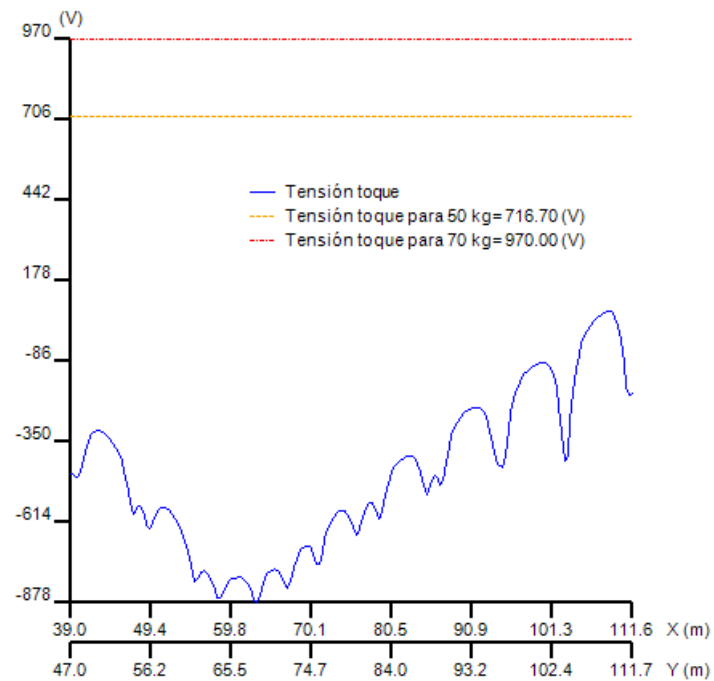


Ilustración 9. Perfil de tensión de toque en la ruta N°1 de evaluación

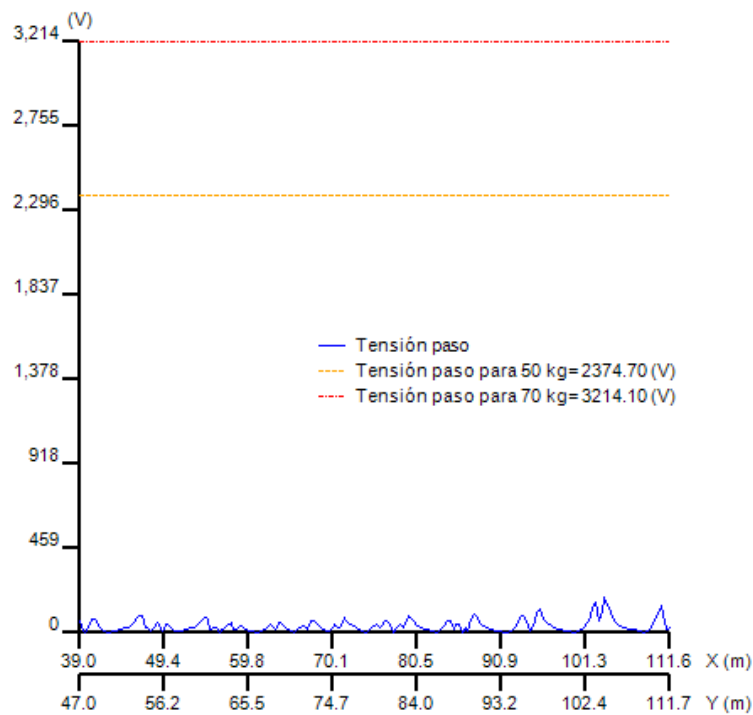


Ilustración 10. Perfil de tensión de paso en la ruta N°1 de evaluación

Del perfil de tensión de toque y de paso se puede observar que no se presentan potenciales peligrosos para el personal en la zona del patio de llaves.



4.6.2. RUTA N°2 DE EVALUACIÓN

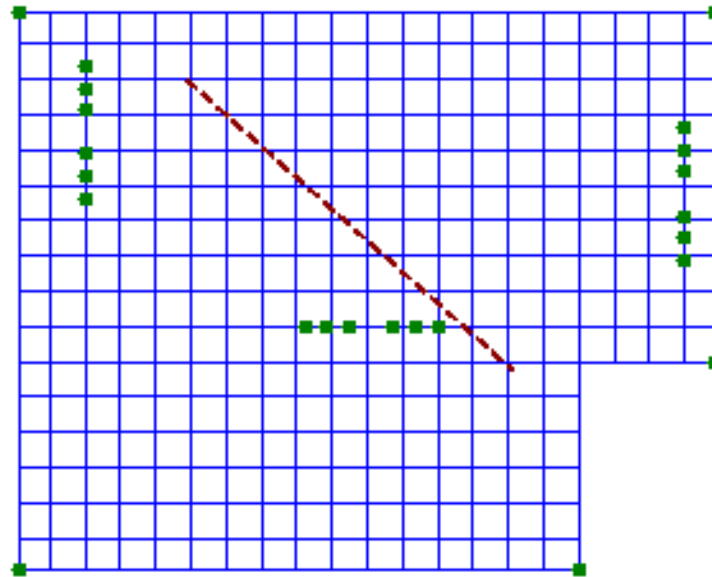


Ilustración 11. Ruta N°2 de evaluación de la tensión de toque y paso.

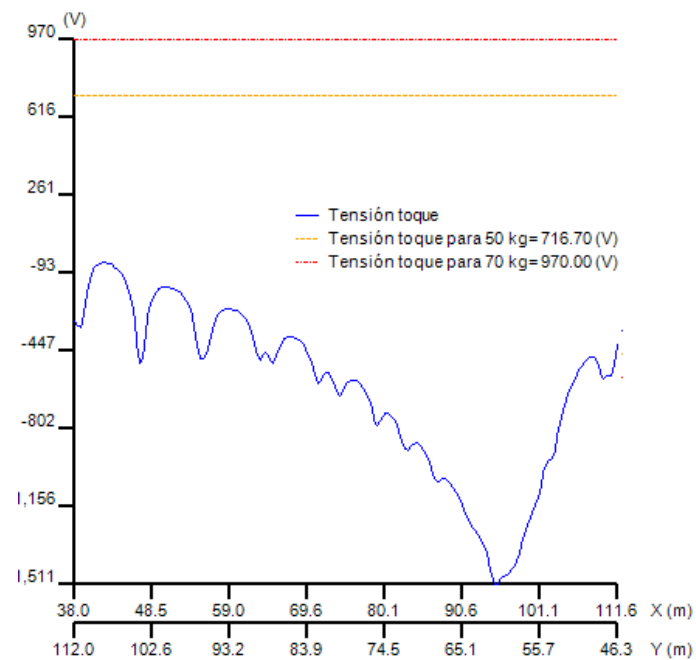


Ilustración 12. Perfil de tensión de toque en la ruta N°2 de evaluación



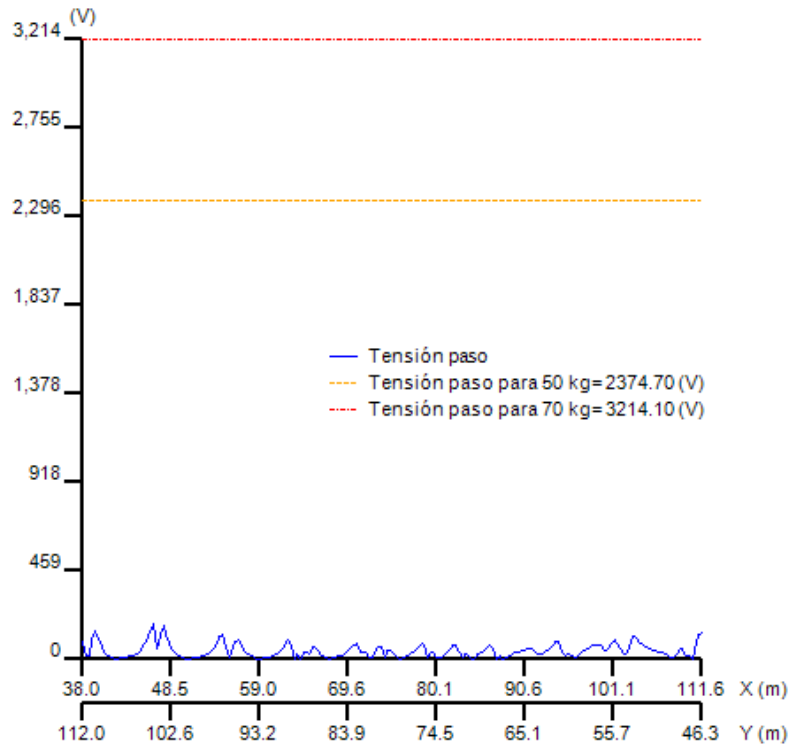


Ilustración 13. Perfil de tensión de paso en la ruta N°2 de evaluación.

Del perfil de tensión de toque y de paso se puede observar que no se presentan potenciales peligrosos para el personal en la zona del patio de llaves.

4.6.3. RUTA N°3 DE EVALUACIÓN

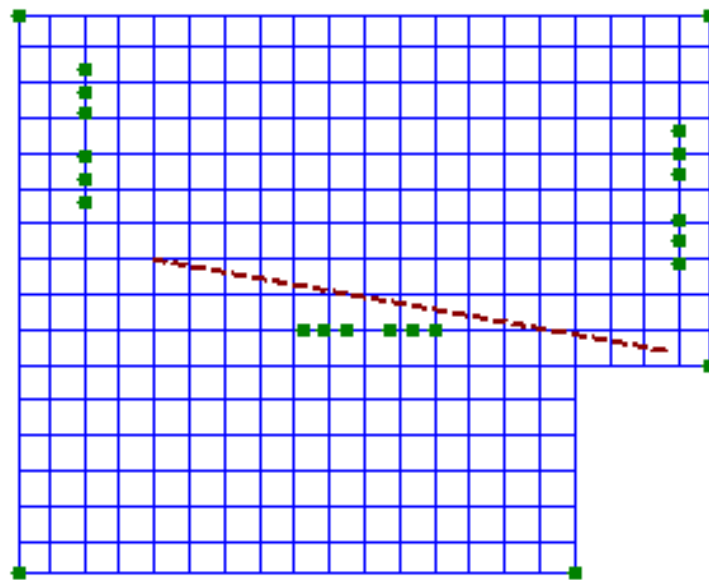


Ilustración 14. Ruta N°2 de evaluación de la tensión de toque y paso.



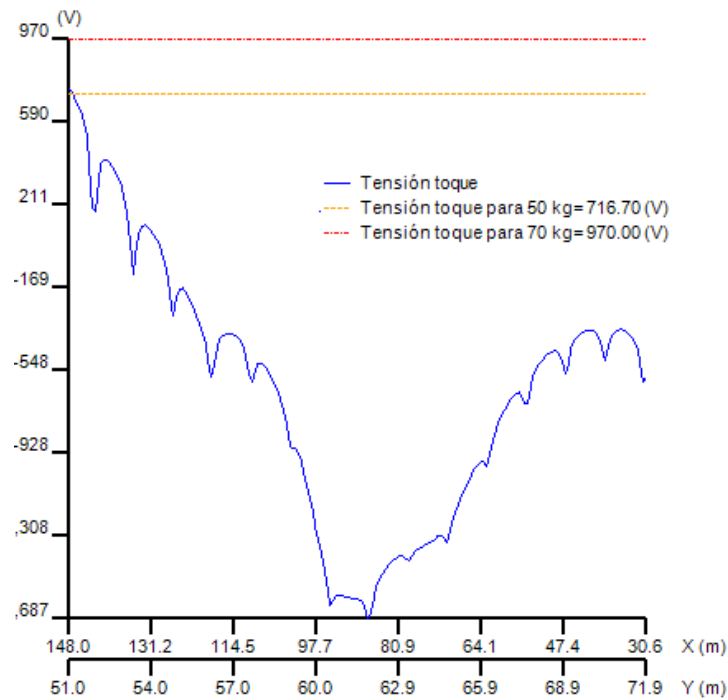


Ilustración 15. Perfil de tensión de toque en la ruta N°2 de evaluación

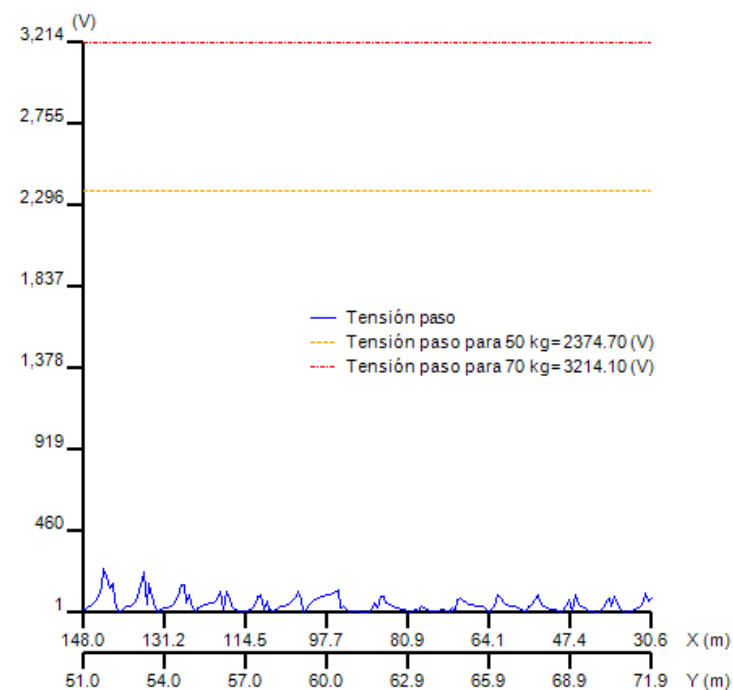


Ilustración 16. Perfil de tensión de paso en la ruta N°2 de evaluación.

Del perfil de tensión de toque y de paso se puede observar que no se presentan potenciales peligrosos para el personal en la zona del patio de llaves.



4.7. SUPERFICIE DE Tensión DE TOQUE

La herramienta de cálculo implementada, permite hacer evaluaciones de superficies de tensión en sectores cuadrados; para el análisis de la subestación Friaspata 220 kV, se tomó 1 sector (área) de evaluación, correspondiente a la zona de ampliación del proyecto, considerado como el más representativo o en donde se esperaría que se pudieran producir tensiones peligrosas.

ÁREA DE EVALUACIÓN: CAMPO DE LA SUBESTACIÓN FRIASPATA 220 kv

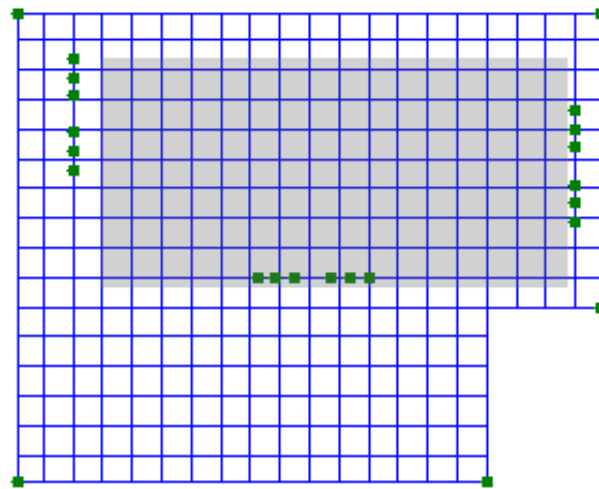


Ilustración 17. Área de evaluación para la superficie de tensión de toque

- Superficie de tensión de toque para el área evaluada:

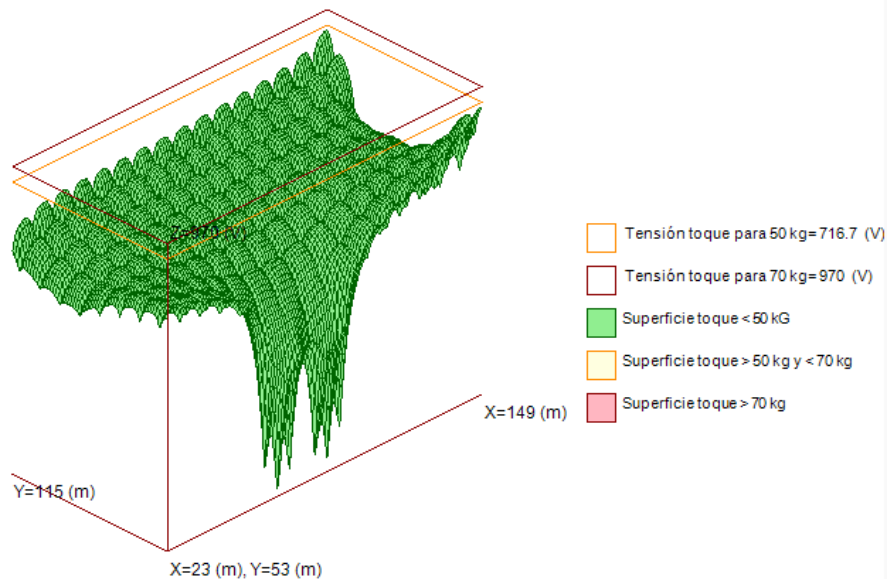


Ilustración 18. Superficie de tensión de toque para el área de evaluación

Se verificó que las tensiones de contacto producidas durante fallas a tierra, no superan las admisibles por una persona de 50 kg y 70 kg de peso que se encuentre expuesto a ocurrencia de las mismas, lo cual se da ante contactos con superficies metálicas conectadas a la malla de puesta a tierra. A pesar que en ciertos puntos perimetrales no se cumplen estas tensiones, debe considerarse que en los mismos puntos no hay posibilidad de ocurrencia de tensiones de contacto.

4.8. ESPECIFICACIONES PARA EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Se presentan las especificaciones generales para el suministro de los materiales y herramientas requeridos para la puesta a tierra de los equipos y estructuras correspondientes a la ampliación de la subestación Friaspata-GIS 220 kV.

4.8.1. EXCAVACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LA RED

Se excavarán zanjas para instalar el conductor de cobre desnudo a 0,80 m de profundidad desde la superficie del terreno. Posteriormente, se rellenarán y compactarán con material seleccionado de la excavación.

4.8.2. CABLES

Los cables de cobre desnudo serán fabricados con alambre de cobre suave, electrolítico, recocido, sin estañar, trenzados en capas concéntricas. Estos cables cumplirán con los requisitos establecidos por la norma ASTM-B8.

El cable especificado será de 19 hilos y sus secciones será de 107 mm^2 (4/0 AWG) para retícula de la malla de puesta a tierra principal y para las colas de conexión de los equipos, estructuras, tuberías y otras conexiones menores de acuerdo a lo indicado.

Los cables serán sometidos a pruebas sobre sus características físicas, mecánicas y eléctricas, de acuerdo con la norma ASTM-B37.

4.8.3. EMPALMES

Todas las conexiones entre cables de la retícula principal de puesta a tierra y entre la retícula principal y las colas de conexión de equipos y elementos metálicos se harán con soldadura exotérmica.

4.8.4. ELECTRODOS DE TIERRA (VARILLAS)

Las varillas de puesta a tierra de 16 mm (5/8") de diámetro y 2,4 m de longitud, serán de alma de acero con revestimiento de cobre electrolítico (tipo copperweld o similar) bajo la norma ANSI-UL-467.



4.8.5. CONDICIONES DE INSTALACIÓN

La malla de tierra de la subestación será construida como se indica en los planos de diseño. La ubicación de la malla de tierra y colas es ilustrativa, ella se debe localizar lo más cerca posible al sitio indicado, **VERIFICANDO QUE NO EXISTA INTERFERENCIA CON LOS CIMIENTOS Y OTRAS OBRAS CIVILES.**

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- IEEE Std. 80, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”.
- IEEE Std. 81, “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”.
- IEEE Std. 142, “Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”.
- ASTM – B8, “Concentric Lay Stranded Copper Conductors, Hard, Medium Hard, or Soft: Standard Specification”.
- ASTM – B3, “Soft or Annealed Copper Wire”.
- ANSI – UL 467, “Standard for Grounding and Bonding Equipment”.
- MALLA DE TIERRA – MEMORIA DE CÁLCULO, PROYECTO AMPLIACIÓN 17 SUBESTACIÓN FRIASPATA 220 kV – GIS, HMV INGENIEROS, ISA.

