



CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS, INCLUYENDO EL EFECTO DEL GRADIENTE DE POTENCIAL EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS CIRCUNDANTES

CONSIDERATIONS IN THE DESIGN OF ELECTRICAL SUBSTATIONS, INCLUDING THE EFFECT OF POTENTIAL GRADIENT ON SURROUNDING METALLIC STRUCTURES

Wilo Chiliquinga¹ , Pablo Robles^{2,*} 

Recibido: 23-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 22-06-2022, Publicado: 01-07-2022

Resumen

Para el diseño y el estudio de un sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica (*Grounding Systems, GS*, en inglés), se considera una subestación remota simple según los procedimientos de seguridad indicados en la norma IEEE 80. Los materiales metálicos enterrados o las estructuras metálicas cercanas ponen en peligro permanente la vida humana cuando se producen fallas eléctricas. Se presentan escenarios relacionados con el diseño de subestaciones eléctricas que consideran la transferencia de potenciales eléctricos que pueden producirse entre la GS y los materiales metálicos enterrados en sus proximidades. Se evalúa el comportamiento de la transferencia de potencial, se calculan los valores de las tensiones transferidas y se identifican las principales variables que influyen en los niveles de tensión transferidos. Las simulaciones se realizan con el programa CYMGRD específico para el cálculo de GS. Su análisis genera resultados reales en la transferencia de potencial que deben ser considerados por el ingeniero de diseño de GS, lo que permite evitar el diseño de subestaciones aisladas sin tener en cuenta los elementos existentes que pueden afectar al entorno de la subestación.

Palabras clave: subestación eléctrica, sistemas de puesta a tierra, red de tierra, transferencia de potencial, tensión de paso y de contacto, estructuras metálicas enterradas

Abstract

For designing and studying an electrical substation grounding system (GS), a simple remote substation is considered according to the safety procedures indicated in the IEEE 80 Standard. Buried metallic materials or nearby metallic structures permanently endanger human life when electrical faults occur. Scenarios related to the design of electrical substations that consider the transfer of electrical potentials that can occur between the GS and buried metallic materials in their vicinity are presented, the behavior of potential transfer is evaluated, values of transferred voltages are calculated, and the main variables that influence the transferred voltage levels are identified. The simulations are performed with the CYMGRD software specific for GS calculations. Its analysis generates real results in the potential transfer that must be considered by the GS design engineer, which enables to avoid designing isolated substations without taking into account existing elements that may affect the substation surroundings.

Keywords: Electrical substation, grounding systems, ground grid, potential transfer, step and touch voltage, buried metal structures

¹Master of Electricity Program, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.

^{2,*}Research Group on Smart Grids GIREI, IUS-RECI Electricity Grids and Smart Cities, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Corresponding author ✉: pablo121075@icloud.com

Forma sugerida de citación: Chiliquinga, W. and Robles, P. "Consideraciones en el diseño de subestaciones eléctricas, incluyendo el efecto del gradiente de potencial en las estructuras metálicas circundantes". *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*. N.º 28. pp. 9-24. 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.01>.

1. Introducción

El GS es un factor esencial en la seguridad humana y el mantenimiento de las entradas eléctricas que constituyen una subestación, al considerar su costo y durabilidad [1]. En el GS, las corrientes de falla a tierra deben ser disipadas de forma segura para retornar la tierra a sus fuentes, de manera que los dispositivos de protección puedan desconectar rápidamente la alimentación y eliminar la falla. Sin embargo, las corrientes de falla que fluyen a través de la red de tierra también lo hacen a través de otros objetos metálicos enterrados, incluyendo sistemas de puesta a tierra conectados a otras instalaciones no afectadas por las fallas [2], [3], [4], [5].

A pesar de que los GS pueden estar físicamente aislados entre sí, están ligados eléctricamente a través de acoplamientos indeseados, que transfieren potenciales eléctricos peligrosos desde las mallas con corrientes de falla a las mallas pasivas no energizadas de otros GS, con el riesgo de electrocución para el personal presente en esas áreas [6], [7], [8], [9]. Un aislamiento deficiente en la industria del petróleo y gas contribuye a tiempos de parada innecesarios, pero la falta de una buena puesta a tierra también es peligrosa y aumenta el riesgo de falla de los equipos, lo que conlleva a errores en la instrumentación, problemas de distorsión armónica y problemas de factor de potencia [10], [11], [12].

Los oleoductos y gasoductos son estructuras grandes y sofisticadas que deben estar protegidas contra descargas eléctricas y, especialmente, contra la corrosión. En el diseño del GS debe incluirse protección catódica [CP], además de los efectos eléctricos que pueden ocurrir cuando estos dos sistemas, GS y CP, están juntos [13], [14], [15], [16], [17].

Este artículo apunta a presentar casos de estudio sobre los problemas introducidos por la presencia de estructuras metálicas y los sistemas de protección asociados, entre otros, en la transferencia de gradientes de potencial [GPG] en GS pasivos. Los procedimientos de diseño descritos en los estándares relacionados con los GS de subestaciones eléctricas, en áreas urbanas y estaciones de petróleo, permiten el cálculo de niveles seguros de tensiones de paso y de contacto dentro del área de la subestación, pero los GPG adyacentes no son tomados en cuenta [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24].

El tipo de material utilizado puede ser un factor decisivo en la electrocución humana. Dentro de las subestaciones, la tensión de contacto (*Maximum Touch Voltage*, MTV, por sus siglas en inglés) y la tensión de paso (*Maximum Step Voltage*, MSV, por sus siglas en inglés) son menos peligrosas debido a la capa superficial de alta resistividad [25]. Sin embargo, esta capa no se extiende hacia el exterior de las subestaciones, donde las tensiones de contacto y paso pueden ser dañinas, y aún más si hay estructuras metálicas enterradas adjuntas no conectadas al GS [26], [27], [28]; [29].

1.1. Trabajos relacionados

El gradiente de potencial generado [30], [31] en complejos refinadores de petróleo, en el caso de una falla en una subestación eléctrica, causa su transferencia a las áreas de procesos, provocando daños al sistema de instrumentación [32, 33].

Las partes metálicas tales como tuberías de agua y gas, rieles y cimientos de los edificios pueden modificar la distribución de potencial eléctrico en el área, dependiendo de la topología estructural, lo cual desencadena en el efecto del GPG [8].

El GS debe considerar los conductores directamente involucrados en la instalación protegida, y cualquier otra, conectada o no, que puede interactuar con todo el GS (Figura 1).

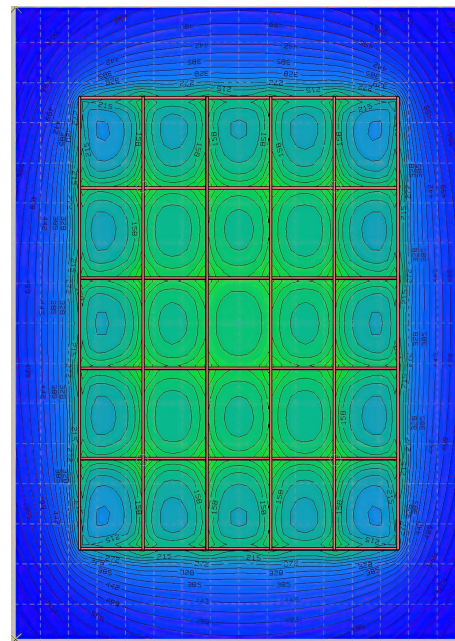


Figura 1. Contorno equipotencial de una malla de un GS

Las tuberías que transportan productos peligrosos están protegidas contra la corrosión, usualmente, por capas de materiales de recubrimiento integrados con sistemas de protección catódica activa [34, 35]. El flujo de corriente, típicamente adoptado para estructuras grandes o largas, fuerza a la tubería para comportarse como un cátodo, proporcionando así protección contra la corrosión de sus partes expuestas cuando el recubrimiento falla. Sin embargo, las líneas enterradas con protección catódica cerca de las redes de aterramiento de subestaciones eléctricas, permiten la posibilidad de unión y reducen el riesgo de tensiones de contacto metal con metal. Esta conexión de unión, necesaria para la seguridad del personal operativo, puede comprometer la efectividad de la CP. Para evitar la corrosión del CP y de la unión con la malla, deben considerarse sales minerales que se ionizan formando un electrolito sólido con el pH que varía entre 8

2. Materiales y metodos

2.1. Formulación del problema

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo de la metodología de diseño de la subestación eléctrica, incluyendo el efecto del gradiente de potencial sobre las estructuras metálicas circundantes, donde la experiencia del diseñador permite obtener resultados de acuerdo con el umbral del voltaje de contacto y el umbral del voltaje de paso.

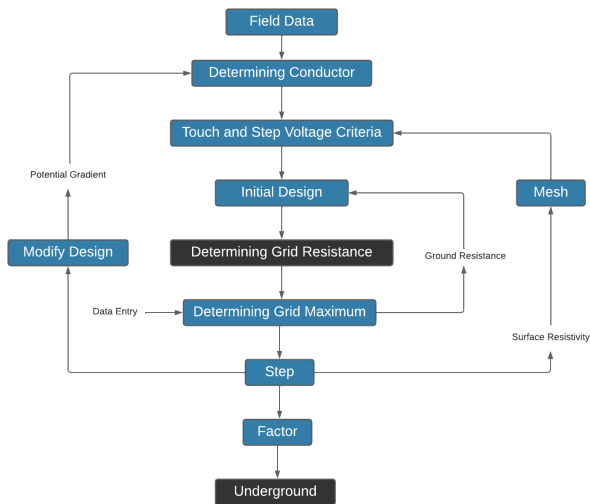


Figura 2. Metodología utilizada para el diseño

Se presentan casos de estudio que permitirán analizar la transferencia de potencial. La simulación de los escenarios se lleva a cabo con el software especializado CYMGRD, usando el método de elementos finitos (MEF) desarrollado por EATON; este software permite la interpretación de las mediciones de resistividad del suelo, elevación del potencial de tierra, y evaluación de puntos peligrosos en cualquier área de interés adicional, genera una interpretación visual de los resultados del análisis del potencial de la malla. Los escenarios propuestos están de acuerdo con el tipo de capa superficial empleada y el análisis de transferencia del potencial; la data de entrada presentada corresponde a la Tabla 3.

El presente estudio se enfoca en la variación de la capa superficial, la ubicación física de la malla y las diferentes ubicaciones de las estructuras metálicas circundantes.

En el caso de redes asimétricas, el análisis es similar; tomando la estratigrafía del terreno, la métrica de estudio de la transferencia de gradientes de potencial expuestos se aplica a cualquier configuración de red.

Los valores de los parámetros del GS se toman en función de la malla indicada en la Figura 3, de manera que la importancia del voltaje de paso y contacto no

exceda los valores máximos permitidos; el uso de barras de cobre o electrodos no se considera para estas simulaciones.

Tabla 3. Notación general y descripciones

Nomenclatura	Descripción
<i>Uniform</i>	Modelo terrestre
ρ 50 Ω -m	Resistividad de la capa superior
40°C	Temperatura ambiente
0.15 μ m	Espesor de la capa superficial
ρ_s -200 Ω -m - concrete	Resistividad de la capa superficial
ρ_s - 5000 Ω -m - gravel	Resistividad de la capa superficial
ρ_s -10000 Ω -m - asphalt	Resistividad de la capa superficial
0.1sec	Tiempo de duración de la falla
10kA	Corriente de falla
50kg	Masa del cuerpo humano
Sf100V	Factor de división de corriente
Cp100V	Factor de crecimiento
1m	Profundidad de la red
Cu4 - 0AWG	Conductor Cu

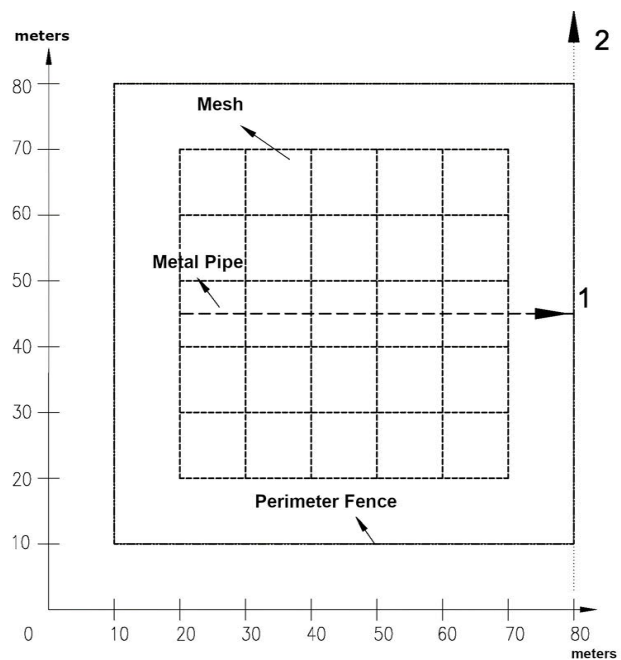


Figura 3. Vista superior del GS del caso de estudio 1

Para el diseño y simulación de los escenarios, se considera el peso del cuerpo de una persona de 50 kg.

Asumiendo el caso más sensible que puede ocurrir, el conductor de malla óptimo para esta configuración es un conductor de cobre de 20,3776 mm², equivalente a 2/0 AWG para la simulación de los escenarios, se toma un conductor de cobre 4/0 AWG, donde el estándar IEEE 80 sugiere considerar los efectos de la corrosión debido al PH de la estratigrafía del suelo [22].

2.1.1. Caso de estudio 1

La Figura 3 muestra una malla de puesta a tierra de una subestación, con una dimensión de 50×50 metros y redes de 10 metros; el conductor del perímetro del

GS está a 1 m de profundidad en suelo uniforme, con un tubo metálico recto cilíndrico a una profundidad de 2 m.

Se analizan aspectos tales como a) los efectos producidos por la transferencia de potenciales en la red cuando está presente una malla perimetral metálica subterránea, y b) los efectos debido a transferencias de potencial causadas por la presencia de un tubo metálico enterrado bajo el GS.

Diferentes configuraciones del GS y de la tubería subterránea fueron consideradas para el análisis. Los potenciales se analizan en una malla asimétrica; se presenta un caso dependiendo de la topología y las facilidades ofrecidas por su construcción en sitio.

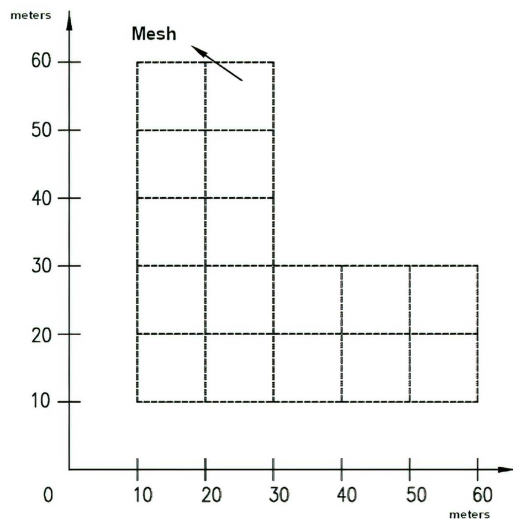


Figura 4. Vista superior de una malla tipo L asimétrica

2.1.2. Caso de estudio 2

En la Figura 5 se agregan rieles ubicados a una distancia «d» de la malla; para el caso de estudio 2, la transferencia de potencial se refleja en los cambios de tensiones de contacto, paso, GPG y R_g que ocurren en las direcciones que serán analizadas.

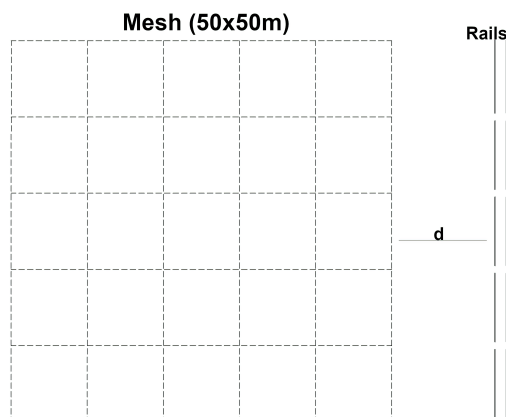


Figura 5. Vista superior de los rieles de la malla

2.1.3. Caso de estudio 3

Se analiza la interferencia mutua de las redes de tierra cercanas para evaluar la circunstancia potencialmente peligrosa en sitios protegidos por la red primaria, incluyendo la proximidad a una adjunta que disipa la corriente de falla a tierra en la tierra circundante, principalmente en áreas urbanas, a) Malla 1 principal y Malla 2 offline, b) Malla 1 primaria y Malla 2 conectada, c) Malla 1 primaria y Malla 2 están conectadas a otros GS.

Se consideran dos mallas del sistema de puesta a tierra, con topología y parámetros técnicos similares. Los ejes adyacentes de las mallas están espaciados una distancia de d metros.

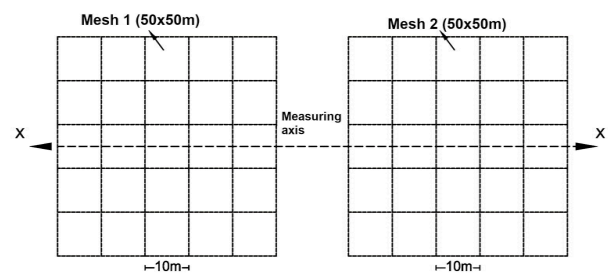


Figura 6. Mallas de puesta a tierras cercanas

2.2. Interferencias entre el GS y la protección catódica

Los estándares y prácticas recomendadas para el diseño de sistemas de protección catódica establecen la necesidad de interconectar estructuras metálicas entre sí. Sin embargo, esta unión equipotencial puede comprometer la protección catódica y la efectividad en la seguridad. Los GS tradicionalmente construidos con electrodos de cobre, debido a sus características de estabilidad a lo largo del tiempo, presentan problemas relacionados con la protección catódica: una malla de tierra de cobre conectada a la estructura bajo protección catódica puede drenar una cantidad considerable de la corriente de protección. Puede ser imposible polarizar correctamente la estructura de acero en escenarios específicos. Si la protección catódica ya no es apropiada, está en riesgo de corrosión debido al acoplamiento galvánico entre el cobre y el acero.

2.3. Impacto de las fallas a tierra en tuberías y posibles soluciones

Los arcos eléctricos destructivos pueden prevenirse conectando los GS con las tuberías. Sin embargo, tal conexión causaría que el sistema de protección catódica drene; esto se resuelve insertando un ISP o una celda de polarización en tal conexión. La corriente de falla conducida por la tubería debe ser disipada a tierra de

manera segura a través de ánodos de sacrificio intencionales desacoplados, como, por ejemplo, materiales de magnesio o zinc, conectados e instalados a lo largo de la tubería con una baja resistividad. Estos ánodos de sacrificio también facilitarían la disipación a tierra de las corrientes conducidas a la tubería desde ubicaciones remotas del área de la subestación.

En vez de unir los conductores, instalar dispositivos de desacoplamiento, tales como aisladores de protección contra sobretensiones entre los electrodos de puesta a tierra y las tuberías, es el mejor compromiso para salvaguardar la seguridad y la funcionalidad durante fallas a tierra. Los desacopladores minimizan el impacto de fallas a tierra en canales mientras preservan la efectividad de la protección catódica.

La seguridad humana depende de la energía absorbida antes de que la falla sea despejada y el sistema sea desactivado; se sugiere establecer los límites de voltaje de contacto y de paso conocidos como umbrales, dependiendo del material utilizado como capa superficial y su factor de reducción, Dalziel y Lee establecen constantes relacionadas con la energía de descarga eléctrica tolerada.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de resultados

3.1.1. Efectos del conductor a tierra de la malla perimetral

No se considera la tubería metálica subterránea; los gráficos de contorno y perfil del gradiente de potencial de los casos se hacen, considerando el piso acabado como el asfalto $\rho_s = 10000\Omega - m$ (Figuras 7 y 8). La malla de tierra y la valla perimetral sin conexión se muestran en las Figuras 9 y ??.

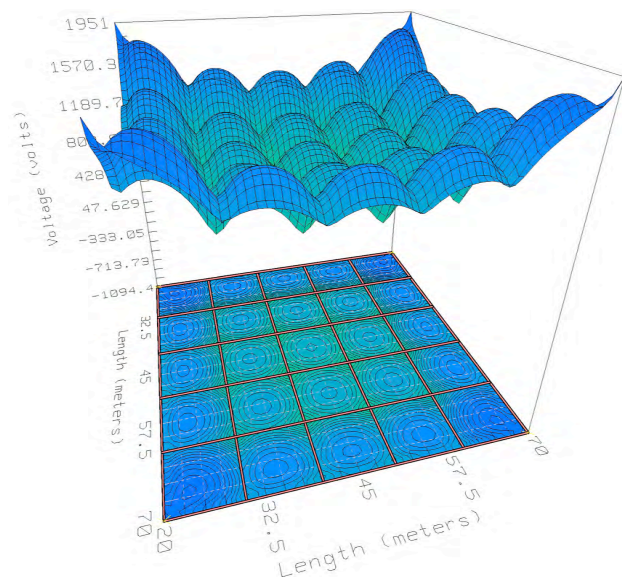


Figura 7. Tensión de contacto, malla aislada- ρ_s de asfalto

Se presenta un resumen de las simulaciones con las condiciones establecidas para el caso de estudio 1, con capas superficiales de concreto, grava y asfalto.

Para un concreto $\rho_s = 200\Omega - m$, los voltajes umbrales de contacto y paso corresponden a 457,82 V y 730,83 V.

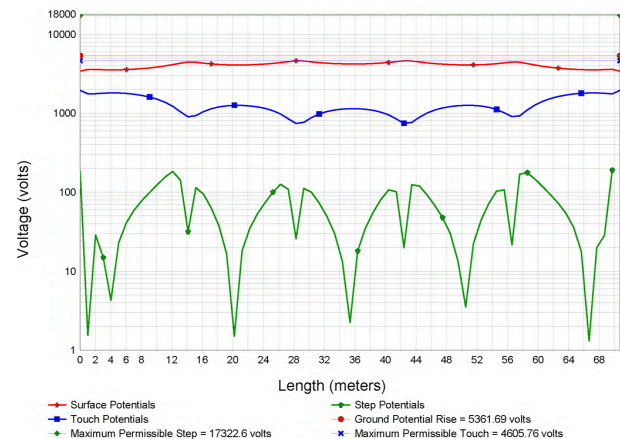


Figura 8. Perfil de potencial de la malla aislada – asfalto ρ_s asphalt

Tabla 4. Malla y valla perimetral sin conexión

$\rho_s = 200\Omega - m$ concrete
 $\rho_s = 5000\Omega - m$ grave
 $\rho_s = 10000\Omega - m$ asphalt

Casos	MTV_{max}	MSV_{max}	GPG
Malla IM aislada	1951.02	190.26	5361.69
Dirección del perfil 1 PA1	1455.92	119.73	5361.69
Dirección del perfil 2 PA2	3599.08	35.53	5361.69
Malla-Red sin conexión MNWC	1015.99	89.43	3932.32
Dirección del perfil sin conexión 1 PA1NC	873.31	57.63	3932.32
Dirección del perfil sin conexión 2 PA2NC	1392.32	92.61	3932.32

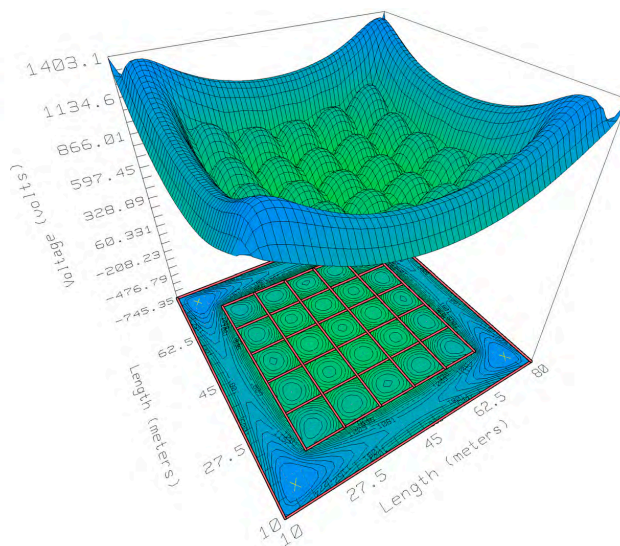


Figura 9. Voltaje de contacto, malla y valla sin asfalto – conexión ρ_s

Cambiando por un piso acabado de grava, $\rho_s = 5000\Omega - m$, los umbrales de voltaje de contacto y paso varían a 2489,47 V y 8857,39 V; con el cambio a asfalto $\rho_s = 10000\Omega - m$, los umbrales de voltaje de contacto y paso son 4605,76 V y 17322,6 V. El material usado como capa superficial permite tener una resistencia de malla R_g de 0.476Ω y para una malla aislada sin conexión cercana a un valor de $0,35\Omega$. El máximo voltaje de contacto [MTV, *Maximum Touch Voltage*, por sus siglas en inglés], el máximo voltaje de paso [MSV, *Maximum Step Voltage*, por sus siglas en inglés], y el GPG se muestran en la Tabla 4.

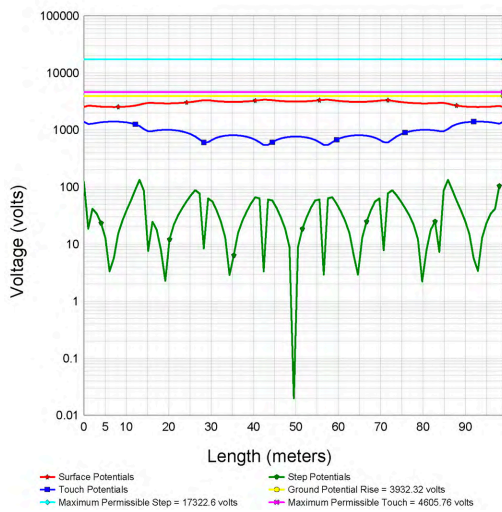


Figura 10. Malla de potencial y perfil de la valla sin asfalto-conexión ρ_s

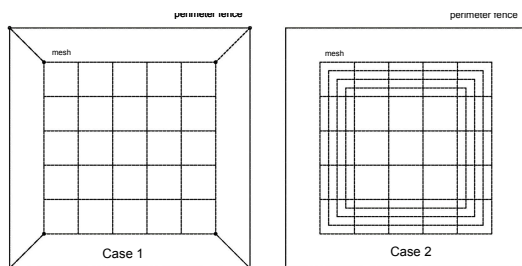


Figura 11. Malla modificada y malla conectada a la valla

De acuerdo con las simulaciones realizadas con diferentes valores de la capa superficial, los umbrales de voltaje de contacto [Threshold Touch Voltages, TTV, por sus siglas en inglés] y voltaje de paso [Threshold Step Voltage, TSV, por sus siglas en inglés] están directamente relacionados con la resistividad de la capa superficial. El cambio de material en la capa superficial a grava o asfalto permite que el voltaje de contacto, voltaje de paso, GS y R_g varíen en favor de la seguridad del ser humano cuando se implanta la valla perimetral. La capa superficial de concreto permite que el MTV exceda los valores de TTV y TSV, lo cual sugiere mejorar la arquitectura de la malla. Sobre la base de la

malla y a la valla perimetral indicada en la Figura 3, las modificaciones hechas a la arquitectura de la malla para reducir el MTV y el MSV cuando la superficie es $\rho_s = 200\Omega - m$, sugieren a) sujetar la malla a la valla perimetral, b) modificar la malla, incrementando los lazos en las partes externas (ver Figura 11). En el caso 1, con el cambio de arquitectura, el TTV y TSV corresponden a 457,82 V y 730,83 V, el $R_g = 0.34\Omega$ no varía, y el MTV y MSV, así como también el GS, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Métrica de malla y perímetro

$\rho_s = 200\Omega - m$ [concrete]			
Casos	MTV	MSV	GPG
Malla y cerca conectada [MFC]	936,7	83,54	3858,7
Malla modificada sin conexión [MMWC]	851,86	150,73	3836,26

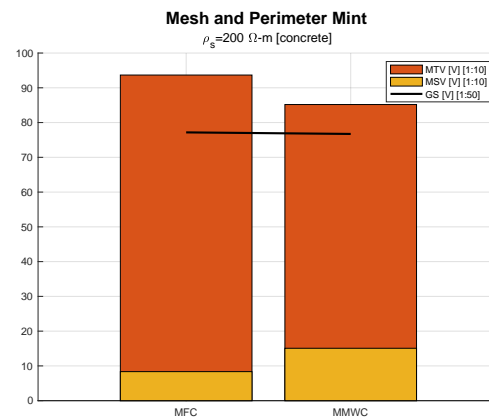


Figura 12. Métrica con cambio en la arquitectura de la malla

3.1.2. Influencia de la malla perimetral

Los resultados permiten observar los efectos de la valla perimetral sobre el MTV, MSV, GPG y R_g : Si el conductor de tierra de la valla perimetral encierra la malla de la subestación, el MTV de la malla disminuye hasta 48 %, y el GS y R_g disminuyen un 27 %. En la Figura 11 se observan las configuraciones más típicas usadas para reducir el voltaje de contacto; en la Tabla 5, el MTV y MSV disminuyen en el caso 1. En el caso 2, con la malla modificada, el MTV disminuye y el MSV aumenta con respecto a los valores indicados en la Tabla 3, cuando hay una malla y una valla sin conexión. Si el GS aumenta, el R_g aumenta; esto es lógico dado que el GS es proporcional a R_g , de acuerdo con su fórmula, $GPG = I_g \cdot R_g$. Cuando el GS aumenta, el voltaje de contacto pico disminuye. En el caso 1, con la malla y la valla conectadas, el máximo valor de voltaje disminuye 8 %, especialmente donde la malla y el riel no están conectados. En el caso 2, con la malla modificada, el máximo voltaje de contacto disminuye

16 % para el caso en el que la malla está presente y la valla está desconectada.

3.1.3. Los efectos de la tubería de metal enterrada

Para analizar los efectos de la tubería sobre la red de tierra, no se toma en cuenta la valla indicada en la Figura 2; se realizan simulaciones de voltaje de contacto, paso y GS en la red y dirección 1. La Tabla 5 corresponde a una tubería de metal de diámetro fijo enterrada a diferentes profundidades, mientras en la Tabla 6 corresponde a una tubería de metal de diámetro variable enterrada a profundidad fija. Se simula un ejemplo de ítem a, con una capa superficial de asfalto para el caso de una tubería de 400 mm de diámetro a una profundidad de 2 m.

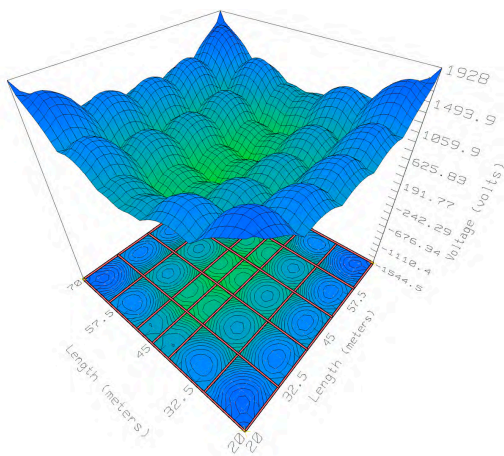


Figura 13. Voltaje de contacto, malla y tubería de asfalto- ρ_s

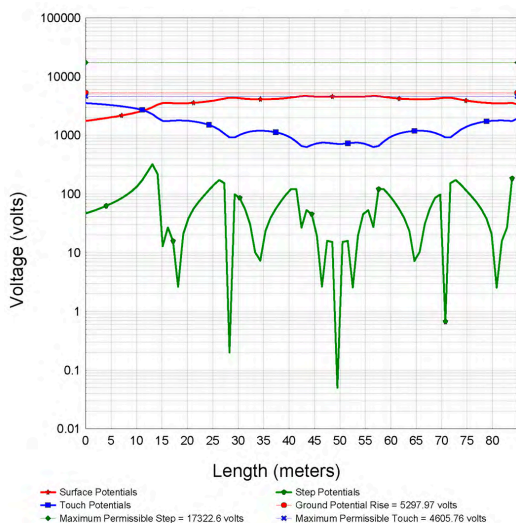


Figura 14. Perfil de potencial en la dirección 1 - malla y tubería - asfalto ρ_s

Se presenta un resumen de las simulaciones realizadas con tuberías de diferentes diámetros, profundidades y capas superficiales de concreto, grava y asfalto; $\rho_s = 200\Omega - m$ [concreto], tubería de diámetro constante y línea metálica subterránea a profundidades de 2, 3, 4 y 5 m, TTV, y TSV corresponden a 457,82 V y 730,83 V cuando se cambia de escenario. Para la capa superficial de grava [$\rho_s = 5000\Omega - m$], TTV y TSV varían entre 2489,47 V y 8857,39 V, para el caso de asfalto como capa superficial con $\rho_s = 10000\Omega - m$, TTV y TSV igual a 4605,76 V y 17322,6 V, R_g se establece en 0,47 Ω . Los voltajes máximos de contacto, paso y PG presentan la variación que se muestra en la tabla.

Tabla 6. Tubería de diámetro constante y profundidad variable

Malla y tubería subterránea (diámetro 400 mm)			
$\rho_s = 200\Omega - m$ [concrete]			
$\rho_s = 5000\Omega - m$ [gravel]			
$\rho_s = 10000\Omega - m$ [asphalt]			
Malla - Tubería 2m [MP2]	1924,62	186	5288,62
Dirección del perfil 11 [PD11]	1053,52	113,23	5288,62
Malla - Tubería 3m [MP3]	1911,75	184,93	5263,10
Dirección del perfil 12 [PD12]	1090,21	112,56	5263,10
Malla - Tubería 4m [MP4]	1897,24	183,78	5235,02
Dirección del perfil 13 [PD13]	1114,58	111,75	5235,02
Malla - Tubería 5m [MP5]	1881,5	182,56	5204,92
Dirección del perfil 14 [PD14]	1131,21	110,75	5204,92

$\rho_s = 200\Omega - m$ [concreto], tubería con diámetro variable iguales a 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 m y profundidad constante, TTV y TSV iguales a 457,82 V y 730,83 V, se utiliza grava con $\rho_s = 5000\Omega - m$ como capa superficial, TTV y TSV iguales a 2489,47 V y 8857,39 V. Para el escenario con asfalto como capa superficial, con $\rho_s = 10000\Omega - m$, el resultado corresponde a 4505,76 V y 17322,6 V, indicando que $R_g = 0.47\Omega$, MTV, MSV y PG presentan la variación que se muestra en la Tabla 7.

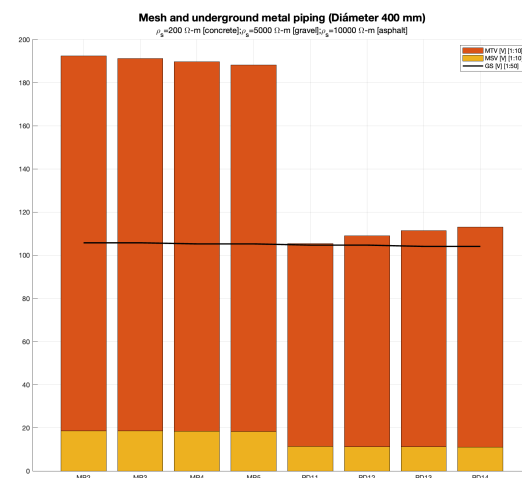


Figura 15. Métrica de malla y tubería metálica subterránea

Tabla 7. Tubería de diámetro variable y profundidad constante- ρ concreto

Malla y tubería metálica subterránea (2m)

$\rho_s = 200\Omega - m$ [concrete]
 $\rho_s = 5000\Omega - m$ [gravel]
 $\rho_s = 10000\Omega - m$ [asphalt]

Casos	MTV	MSV	GPG
Malla - Tubería \varnothing 0.8m [MP0.8]	1920.08	185.26	5276.08.62
Dirección del perfil 11 [PD11]	998.72	112.12	5276.08
Malla - Tubería \varnothing 0.6m [MP0.6]	1922.13	185.59	5261.76
Dirección del perfil 12 [PD12]	1018.71	112.62	5261.76
Malla - Tubería \varnothing 0.4m [MP0.4]	1924.62	186	5288.62
Dirección del perfil 13 [PD13]	1053.62	113.23	5288.62
Malla - Tubería \varnothing 0.2m [MP0.2]	1927.98	186.54	5297.97
Dirección del perfil 14 [PD14]	1104.79	114.06	5297.97

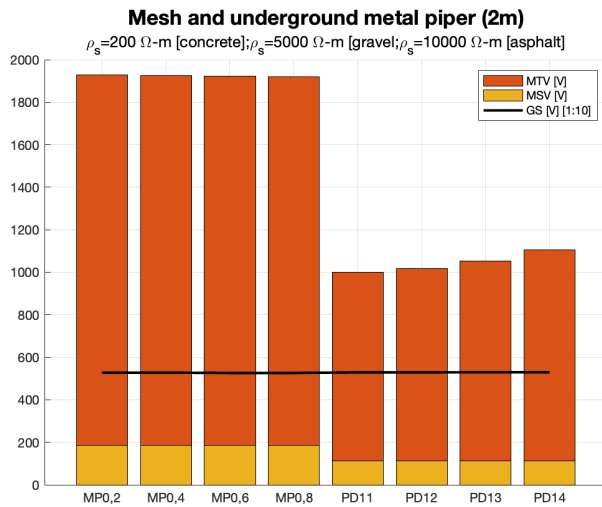


Figura 16. Visualización de valores de la Tabla 8

En presencia de una tubería metálica subterránea que cruza por debajo de la malla, con diámetro constante y profundidad variable, MTV y MSV disminuyen a medida que aumenta la profundidad, mientras que R_g y GS lo hacen a menor escala. Si su diámetro es variable y su profundidad constante, MTV y MSV aumentan cuando el diámetro de tubería disminuye, y R_g y GS aumentan en menor escala. En la Figura 3 se proponen diferentes escenarios, manteniendo constante los parámetros de la malla, diámetro y profundidad variable; el objetivo de estas configuraciones es determinar qué estrategia es más favorable para la disminución de TTV y TSV que puedan generarse en el área superficial de la tubería cuando ocurre una falla en el sistema eléctrico.

3.1.4. Análisis de resultados de tuberías metálicas subterráneas

Se toman como referencia los voltajes MTV [457,82 V] y MSV [730,83 V] del caso 1 indicados en la Tabla 1, donde se recomienda instalar más conductores en la malla de tierra paralelos a la tubería subterránea que pasa debajo; esto ayuda a disminuir TTV y TSV en la

malla, debido al incremento de los campos electromagnéticos. Otra manera de reducir TTV y TSV es hacer que la tubería cruce diagonalmente tanto como sea posible. Un análisis exhaustivo sugiere que las tuberías subterráneas dejan un área en la subestación eléctrica porque las transferencias de voltaje generan valores de GPG y TTV más altos que los admisibles para su configuración. En estos casos se recomienda instalar barras de soldadura de cobre conectadas al inicio y al final de la tubería.

De acuerdo con estudios realizados en la tubería metálica, es posible observar que esto afecta el potencial de la malla. Dentro del área de la red, la tubería metálica enterrada disminuye el TTV y TSV; esto no ocurre en situaciones reales, porque las tuberías siempre entran y salen del área de la red de tierra. Cuando una tubería metálica sale o está fuera del área de la malla, causa una elevación de TTV y GPG en regiones fuera de la malla; esto es lógico debido a que, al aumentar la longitud de la tubería, el incremento en potencial se aproximará al aumento en potencial de la red. Cuando ocurre una falla en el sistema eléctrico, se genera una corriente en la tubería; esto aumenta cuando la tubería está más lejos. Los escenarios presentados con las tuberías metálicas enterradas muestran claramente el peligro de los potenciales transferidos. Para los diseños de GS en subestaciones eléctricas, deben tomarse medidas correctivas cuando hay estructuras metálicas cercanas; el diseñador debe conocer su influencia con precisión aceptable; de lo contrario, pueden aplicar medidas erróneas o injustificadas.

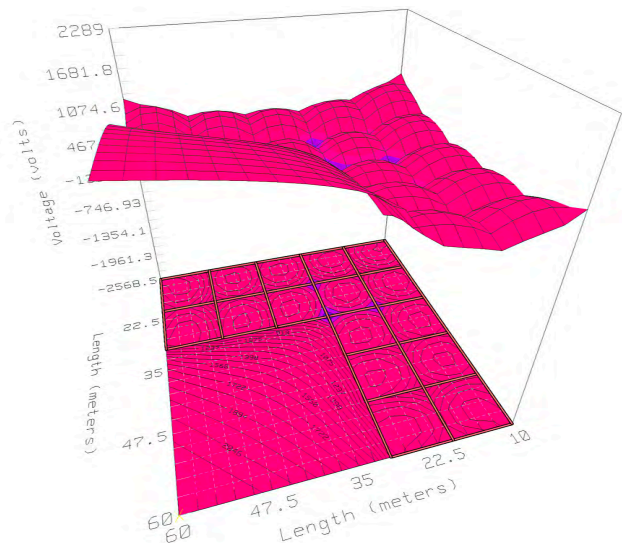


Figura 17. Voltaje de contacto para una malla asimétrica- ρ_s concreto

De acuerdo con buenas prácticas de ingeniería, los procedimientos correctivos se aplican para minimizar la transferencia de potencial cuando las estructuras metálicas están enterradas. Sin embargo, al unir la

estructura metálica a la malla principal se verifica cuidadosamente el procedimiento mencionado, debido a la posible transferencia del incremento en el potencial de las redes [situación inversa]. Proporcione mallas más densas para la red sobre la tubería enterrada. En algunos casos, estas mallas pueden actuar como una malla protectora reduciendo la magnitud del voltaje de contacto. Instale bridas aislantes en las tuberías metálicas subterráneas en ubicaciones apropiadas. La solución óptima en los métodos correctivos a ser utilizadas dependerá de varios factores, tales como las propiedades del suelo, la ubicación de la estructura metálica, y la corriente de falla, entre otros.

3.1.5. Malla tipo L

En la Figura 4 se presenta un estudio del GS de una malla asimétrica; para este caso, se considera una capa superficial de resistividad $\rho_s = 200\Omega - m$ [concreto], obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Malla asimétrica tipo L

Casos	Malla asimétrica tipo L $\rho_s = 200\Omega - m$ [concrete]					
	MTV	MSV	TTV	TSV	$R_g\Omega$	GPG [V]
Malla aislada	457,82	2288,99	730,83	132,11	0,56	3168

En el caso expuesto se observa que, con la capa superficial de concreto, el MTV excede al MSV; en la Figura 16, los procedimientos para mejorar el TTV son los mismos que los expuestos en mallas simétricas o asimétricas

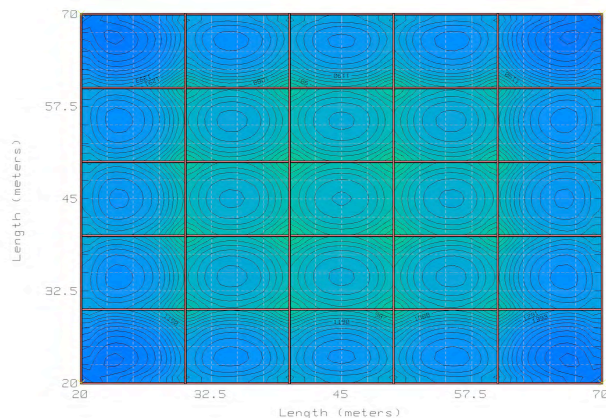


Figura 18. Contorno del potencial de malla – sin rieles

3.1.6. Análisis de resultados del escenario 2

Se consideran una malla y rieles cercanos, utilizando la configuración de la malla indicada en la Figura 3. El estudio se hace basado en lo que se muestra en la Figura 5, y se considera una capa superficial del asfalto.

3.1.7. Caso 2.1 Red de tierra sin considerar rieles cercanos

Se hace un análisis del contorno de potencial de la red de tierra sin considerar los rieles; la Figura 18 muestra la distribución de potencial en la superficie de tierra cuando ocurre una condición de falla.

3.1.8. Caso 2.2 Red de tierra considerando rieles sin conexión a la red

Se propone analizar el contorno de potencial de la red de tierra, considerando los rieles a una distancia [$d = 30$ m] sin conexión; esta es una situación común en subestaciones y plantas eléctricas, y la simulación de los rieles se hace a través de conductores de acero revestidos de aluminio de 90 mm de diámetro, separados una distancia de 1,5 m y con una longitud de 50 m (Figura 19).

3.1.9. Caso 2.3 Red de tierra considerando rieles conectados a la red

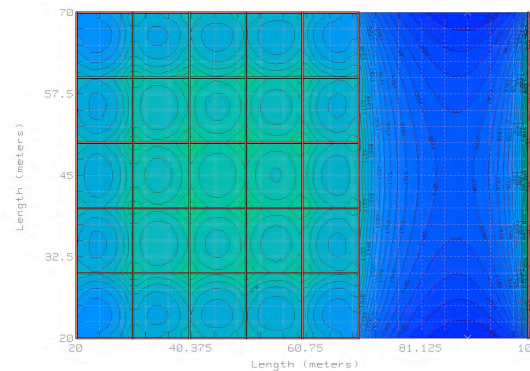


Figura 19. Contornos de potencial de la malla con rieles

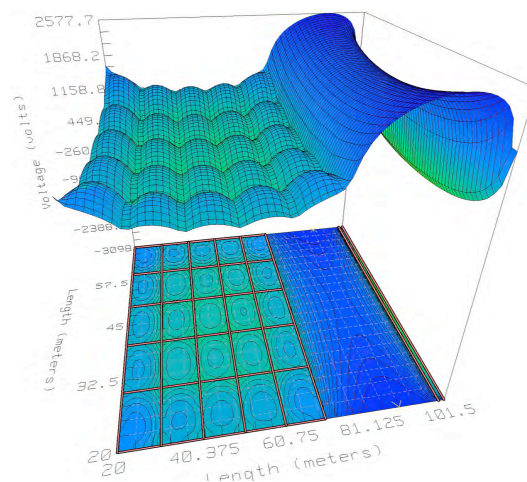


Figura 20. Voltaje de contacto para malla y rieles sin conexión

Se presenta como caso de estudio los contornos de potencial de la red de tierra, considerando los rieles conectados a ella empleando cables AWG 4/0 de cobre en 5 puntos uniformemente distribuidos en los rieles (ver Figura 20). Las Figuras 17, 18, y 19 muestran el cambio en las curvas de potencial cuando se instalan los rieles; las diferencias más importantes pueden verse en la distribución de potencial en los alrededores, dado que se generan altos GS para ser considerados. Las Figuras 19 y 20 muestran que los valores de TTV aumentan en el área entre los rieles y la malla cuando ellos no están conectados; ellos se unen con la malla para reducir estos potenciales (ver Figuras 21 y 22).

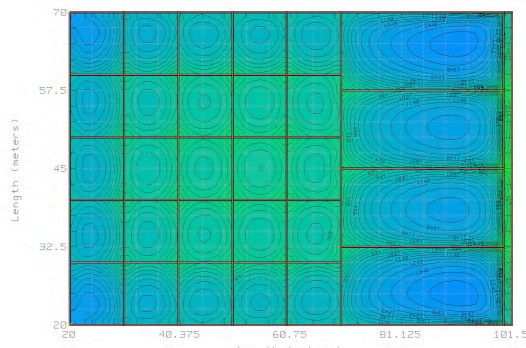


Figura 21. Contornos del potencial de la malla con los rieles conectados

Tabla 9. Tubería de diámetro variable y profundidad constante - ρ concreto

MMalla y rieles (diámetro de los rieles 90 mm, profundidad 10 mm)
 $\rho_s = 10000\Omega \cdot m$ [Asphalt]

Item	Casos	MTV	MSV	GPG
1	Malla aislada [IM]	1951,02	190,26	5361,69
2	Rieles de potencial [PR1]	3984,13	9,57	5361,69
3	Malla y rieles sin conexión 1 [MRWC1]	1651,47	152,99	4606,32
4	Rieles de potencial [PR2]	1739,38	576,69	4606,32
5	Malla - Tubería \varnothing 0,4m [MP0,4]	1924,62	186	5288,62
6	Rieles de potencial [PR3]	717,73	227,69	4201,47
7	Malla y rieles sin conexión 2 [MRWC2]	1671,74	155,12	4657,38
8	Rieles de potencial aislados [PRA]	1606,9	756,61	4657,38

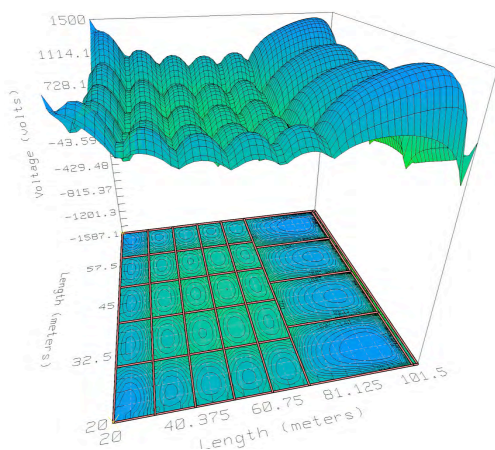


Figura 22. Voltaje de contacto de la pantalla y los rieles conectados

Si los rieles no están conectados a la malla, los valores de TTV y TSV son altos (ver Tabla 9, ítem 2); si están conectados a la red estos disminuyen, así como también los valores de GP and R_g . Otra manera de reducir los potenciales en los rieles cuando estos no están conectados a la malla es aislar las juntas de las uniones (ver Tabla 9, ítem 8); de la misma manera, los rieles pueden ser puestos a tierra utilizando barras de metal o soldadura de cobre.

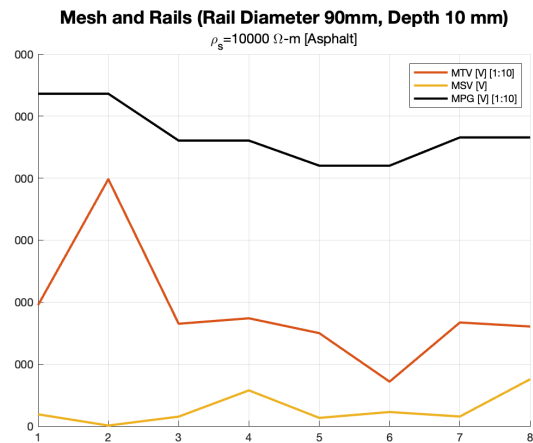


Figura 23. Visualización de los valores de la Tabla 6

3.1.10. Análisis de resultados del Escenario 3

Se consideran las mallas 1 y 2; Figura 6, se usa la configuración de malla indicada en la Figura 3 con una capa superficial de grava y una corriente de cortocircuito de 10 kA.

3.1.11. Malla 1 y Malla 2 sin conexión

Cuando ocurre una falla eléctrica en la malla 1, esta afecta a la malla 2 debido a la diferencia entre el potencial de la superficie de tierra y el potencial de la malla 2; la simulación para las dos mallas se hace variando su distancia, desde 10 hasta 120 metros, obteniendo TTV = 2489,47 V and TSV = 8857,39 V.

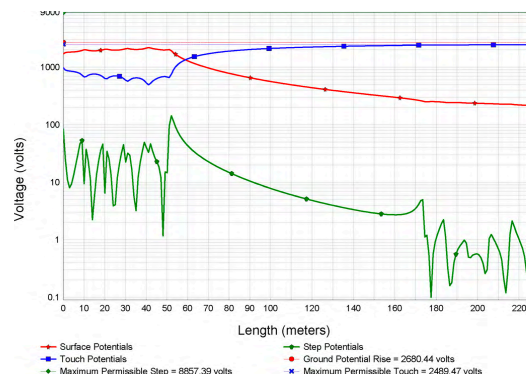


Figura 24. Voltajes de contacto y paso en el eje de medición de las mallas. Malla 1 y Malla 2 sin conexión

Tabla 10. Voltajes de contacto y paso, R_g GPG – Malla aislada

d(m)	Malla 1				Malla 2			
	Voltaje máximo		$R_g \Omega$	GPG	Voltaje máximo		$R_g \Omega$	GPG
	Touch	Step	V	Touch	Step	V	V	
10	980.754	96.58	0.468	2636.63	2054.55	22.64	0.468	734.951
20	978.146	95.8	0.473	2661.43	2165.5	14.71	0.473	607.649
30	976.994	95.49	0.474	2670.57	2234.7	10.86	0.474	522.136
40	976.354	95.33	0.475	2674.82	2284.7	8.44	0.475	409.968
50	976.009	95.26	0.476	2677.06	2323.38	6.77	0.476	409.968
60	975.806	95.21	0.476	2678.34	2354.56	5.56	0.476	370.686
70	975.693	95.18	0.476	2679.11	2380.38	5.64	0.476	382.68
80	975.629	95.17	0.476	2679.61	2420.21	3.93	0.476	311.425
90	975.588	95.16	0.476	2679.94	2420.96	3.41	0.476	288.475
100	975.554	95.14	0.476	2680.16	2437.25	3.99	0.476	268.717
110	975.543	95.14	0.476	2680.32	2451.58	2.65	0.476	251.521
120	975.528	95.14	0.476	2680.4	2464.27	2.36	0.476	236.414

El MTV generado por la malla 1 en la malla 2 crece a medida que se alejan, alcanzando su máximo valor de 2464,27 V a una distancia de 120 m; por otra parte, el MSV disminuye a medida que se alejan. En las mallas 1 y 2, los valores de R_g se mantienen para todas las distancias de separación, mientras que en la malla 2 el GPG disminuye a medida que ellas se alejan. En la línea del eje de medición, se elabora un gráfico de los voltajes de contacto y paso para las redes aisladas 1 y 2, para una distancia $d = 30$ m (Figura24).

3.1.12. Malla 1 y Malla 2 conectadas

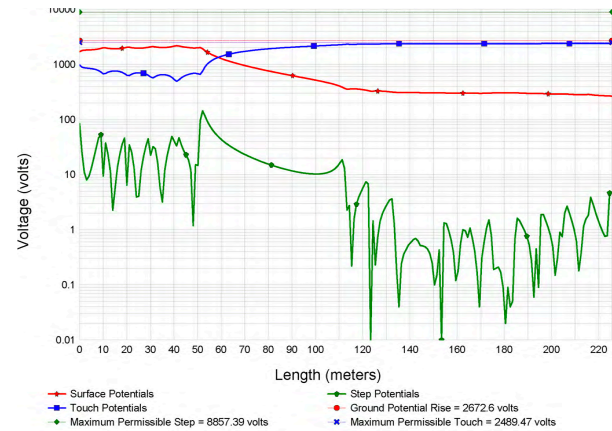
Si las mallas 1 y 2 están conectadas, las corrientes de fuga son las mismas, y se generan voltajes potencialmente peligrosos debido a su simetría geométrica. Estas mallas pueden ser conectadas intencionalmente o no a través de varias instalaciones de metal, tales como cables, tuberías o rieles.

Tabla 11. Voltajes de contacto y paso, R_g , GPG. Mallas 1 y 2 conectadas

d(m)	Malla 1				Malla 2			
	Voltaje máximo		$R_g \Omega$	GPG	Voltaje máximo		$R_g \Omega$	GPG
	Touch	Step	V	Touch	Step	V	V	
10	600.808	52.99	0.307	1731.01	600.808	5.4	0.307	1731.01
20	576.057	51.15	0.296	1668.63	576.057	53.41	0.296	1668.63
30	557.325	49.72	0.287	1619.07	557.325	51.84	0.287	1619.07
40	542.037	48.53	0.28	1577.25	542.037	50.55	0.28	1577.25
50	526.901	47.48	0.273	1540.53	526.901	49.42	0.273	1540.53
60	517.206	46.51	0.268	1507.44	517.206	48.38	0.268	1507.44
70	506.565	45.63	0.262	1477.04	506.565	47.44	0.262	1477.04
80	496.696	44.79	0.257	1448.7	496.696	46.54	0.257	1448.7
90	487.437	43.99	0.252	1422.2	487.437	45.7	0.252	1422.2
100	478.677	43.22	0.248	1397.06	478.677	44.89	0.248	1397.06
110	514.775	47.22	0.263	1481.65	514.775	48.88	0.263	1481.65
120	462.371	41.78	0.24	1350.29	462.371	43.37	0.24	1350.29

Se considera que la conexión de las dos mallas se hace utilizando un cable aislado con las mismas características que aquellos que conforman las mallas respectivas, obteniendo similitud entre MTV y MSV en ambas mallas (ver Tabla 10). En una falla eléctrica, los valores de voltaje se reflejan en la malla 2. Esto indica la necesidad de un análisis exhaustivo; antes de conectar intencionalmente la 1 con la 2, es necesario verificar si las medidas de seguridad aplicadas en las instalaciones de la malla 2 pueden desarrollar voltajes y corrientes a tierra de valores peligrosos. Por otra

parte, la conexión paralela de las mallas del sistema de puesta a tierra disminuye las corrientes a tierra y el TTV asociado con la malla 1. Las métricas del TTV y TSV a una distancia $d = 30$ m se muestran en la Figura 25.

**Figura 25.** Voltajes de contacto y paso en el eje de medición de las mallas. Malla 1 y Malla 2 conectadas

3.1.13. Malla 1 y Malla 2 sin conexión – Malla 2 subterránea

Las estaciones, fuente de transformadores de distribución, están frecuentemente ubicadas cerca de los edificios circundantes en áreas urbanas. Por otra parte, los GS son frecuentemente interconectados intencionalmente o sin intención; por lo tanto, ellos tienden a tener una R_g muy baja. Es esencial evaluar los voltajes potencialmente peligrosos que pueden aparecer en la red de tierra del edificio adyacente más cercano a la subestación.

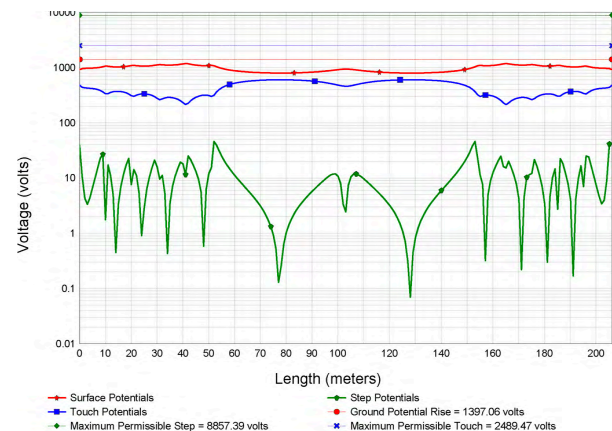
**Figura 26.** Voltajes de contacto y paso en el eje de medición. Malla 1 y Malla 2 aisladas – Malla 2 aterrada

Tabla 12. Voltajes de contacto y paso, R_g , GPG. Mallas 1 y 2 aterradas

d(m)	Malla 1				Malla 2			
	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG	Voltaje máximo		$R_g\Omega$	GPG
	Touch	Step	V	Touch	Step	V		
10	989.093	98.77	0.46	2589.35	2101.29	31.52	0.46	549.539
20	981.739	96.67	0.46	2638.14	2202.31	20.62	0.46	483.27
30	978.94	95.97	0.474	2656	2268.01	15.1	0.474	423.433
40	977.658	95.68	0.474	2663.49	2320.62	12.7	0.474	367.376
50	976.7981	95.47	0.474	2669.13	2355.08	10.32	0.474	333.388
60	976.309	95.36	0.474	2672.6	2382.59	8.57	0.474	305.593

Se calcula el potencial de distribución en la superficie de tierra de la red 1, donde se ubica la subestación fuente de distribución, y la red 2, que representa la red de tierra del edificio más cercano a la subestación. Los cálculos se hacen suponiendo que la malla de tierra del edificio está conectada a las mallas de tierra de los edificios circundantes; se supone que las mallas de las estructuras tienen las mismas características y parámetros técnicos que la malla 1. La simulación de las dos redes se hace variando su distancia, entre 10 y 60 metros, obteniendo TTV = 2489,47 V y TSV = 8857,39 V. En las áreas urbanas, el MTV en el edificio vecino para $d = 30$ m presenta valores altos; sin embargo, los voltajes de paso en el espacio entre la subestación y la instalación adjunta son más altos para las redes conectadas. La transferencia de potenciales peligrosos y los parámetros técnicos de la malla y la tierra dependen principalmente del valor de la corriente de falla. Una distancia considerable entre mallas cercanas no garantiza una disminución en la transferencia de potenciales peligrosos. En las subestaciones eléctricas, el valor de resistividad de la capa superficial es un parámetro importante a tomar en cuenta; su valor influye directamente los valores de TTV y TSV de la subestación y, por lo tanto, los gradientes de potencial transferidos.

4. Conclusioness

A partir de los escenarios presentados en este estudio con variables de resistividad de la capa superficial y diferentes configuraciones, se ha determinado la variación del GPG para varias estrategias. Se han relacionado y evaluado los parámetros técnicos que aparecen en los diseños de GS, observando cómo estos influyen sobre el GPG.

Este artículo presenta la simulación y el análisis de escenarios reales de transferencia de potencial entre subestaciones eléctricas y estructuras metálicas. Sobre la base de ellos, se han obtenido los resultados que reflejan los valores de transferencias peligrosas de voltajes a estructuras metálicas cerca de una subestación, excediendo los valores de TTV y TSV permitidos en un GS. Se indican las medidas y procedimientos tomados en cuenta para reducir los voltajes de transferencia en el diseño y construcción de GS.

Los valores de corriente de corto circuito, resistividad del suelo, distancias y ubicación entre estructuras metálicas cercanas, entre otros parámetros de diseño, influyen sobre las transferencias de potenciales eléctricos entre una subestación y las estructuras metálicas adjuntas. Es esencial considerar el GPG generado en un GS fuera del área de la subestación, los efectos de interferencia de potenciales generados por la existencia de estructuras metálicas, y los GS cercanos a la subestación.

En redes cercanas, se hizo un análisis de situaciones potencialmente peligrosas que pueden aparecer cuando se transfieren los potenciales generados por las corrientes de falla a tierra a las redes y al equipo de tierra cercano y al personal protegido por ellos. En el diseño de sistemas de protección catódica para tuberías en estaciones de petróleo, se evitan tanto como sea posible las interferencias de los GS conectados a la red de la subestación con los sistemas de protección catódica. De lo contrario, el problema debe profundizarse, proponiendo soluciones apropiadas a esta interferencia, lo cual prevendría comprometer la efectividad del sistema de protección catódica.

Se realiza un análisis detallado de los escenarios cuando la red está cerca de otros objetos puestos a tierra; estas circunstancias son necesarias para instalar subestaciones en áreas urbanas. El análisis realizado en el documento ha mostrado que las fallas a tierra en una conexión no intencional de redes de tierra, puede causar altos TTV y TSV en mallas cercanas que puede llevar a riegos severos para el ser humano que las conduce.

Referencias

- [1] J. Nahman and D. Salamon, "Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 166–173, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.029>
- [2] L. Fu, "The influence of Urban Substation on Neighbouring Metal Grounding System," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1176, no. 4, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/4/042051>
- [3] L. Neamt, H. Balan, O. Chiver, and A. Hotea, "Considerations about Substation Grounding System Design," in *Proceedings of 2019 8th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759737>
- [4] M. L. Di Silvestre, L. Dusonchet, S. Favuzza, S. Mangione, L. Mineo, M. Mitolo, E. R. Sanseverino, and G. Zizzo, "On the Interconnections of

- HV-MV Stations to Global Grounding Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 1126–1134, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2875383>
- [5] G. Aiello, S. A. Rizzo, S. Alfonzetti, and N. Salerno, “Computation of Transferred Potentials from Grounding Grids by Means of Hybrid Methods,” in *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2018.8493916>
- [6] L. Popović, “Preliminary testing and assessment of safety conditions of HV substations located in urban areas,” *Electric Power Systems Research*, vol. 195, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107111>
- [7] C. Martineac and R. N. Hasanah, “Influence of soil resistivity on substations earth grounding system,” in *Proceedings of 2019 8th International Conference on Modern Power Systems, MPS 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759796>
- [8] G. Cafaro, P. Colella, P. Montegiglio, E. Pons, R. Tommasini, F. Torelli, and G. Valtorta, “Ground Resistance of Buried Metallic Parts in Urban Areas: An Extensive Measurement Campaign,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 6, pp. 5209–5216, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2748502>
- [9] W. A. Byrd, “Below Grade Coated Direct Imbedded Steel Pole Corrosion Failures With Solutions,” *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 41–46, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JPETS.2018.2884974>
- [10] Q. Lv, Z. Xiang, X. Li, J. Ai, S. Liu, and C. Zhang, “Research on overvoltage protection strategy of oil-gas pipeline based on non-metallic grounding material,” in *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, IGBSG 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 97–102. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2019.8886338>
- [11] S. A. H. Mohammed and I. M. Abdulbaqi, “Numerical Study and Design of an Impressed Current Cathodic Protection System for Buried Metallic Pipes,” in *2018 3rd Scientific Conference of Electrical Engineering, SCEE 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 95–100. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SCEE.2018.8684076>
- [12] E. Inga and R. Hincapié, “Creación de artículos académicos basados en minería de datos y Web 2.0 para incrementar la producción científica en ingeniería,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 10, no. 20, pp. 65–74, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3MX1Woz>
- [13] T. H. Shabangu, P. Shrivastava, B. T. Abe, K. B. Adedeji, and P. A. Olubambi, “Influence of AC interference on the cathodic protection potentials of pipelines: Towards a comprehensive picture,” in *2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa, AFRICON 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 597–602. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095549>
- [14] G. Liu, G. Jiang, Z. Zhang, D. Mei, and Y. Zheng, “Research on the influence of DC current overflowing on grounding electrode corrosion,” in *Proceedings of 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2017*, vol. 2017-Janua. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 291–295. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122438>
- [15] M. G. Mahlobo, P. Mjwana, M. N. Tladi, B. A. Obadele, P. A. Olubambi, and P. Refait, “Evaluation of cathodic protection performance of carbon steel pipeline buried in soil: A review,” in *2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2018*, vol. 2018-Janua. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 37–43. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2018.8340417>
- [16] B. Zhang, F. Cao, X. Meng, Y. Liao, and R. Li, “Numerical approach of impressed potential on buried pipelines near high-voltage DC grounding electrodes,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1177–1182, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1436>
- [17] F. Babaghayou, B. Zegnini, and T. Seghier, “Experimental model investigation of the corrosion of buried steel pipelines with cathodic protection near high voltage power lines,” *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016*, pp. 1–6, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2016.8066812>

- [18] H. Xuedong, Y. Wei, L. Xinghua, S. Xiangping, and H. Xuyin, "Analysis of grounding status of substation secondary system and improvement measures," in *China International Conference on Electricity Distribution, CIGED*, 2018, pp. 1479–1483. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CIGED.2018.8592194>
- [19] M. Di Silvestre, L. Dusonchet, S. Favuzza, S. Mangione, L. Mineo, M. Mitolo, E. Sanseverino, and G. Zizzo, "Interconnections criteria of grounding grids in global grounding systems," in *Conference Record - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, vol. 2018-May, 2018, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPS.2018.8369974>
- [20] R. Pereira Sodre, B. Lopes Pereira, L. Leite Sidrim, J. F. Almeida, and C. L. S. Souza Sobrinho, "Optimization of Grounding Grids Design for a Square-Shaped Mesh," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 135–139, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8291465>
- [21] C. Payshetti, H. Jadhav, and S. Kulkarani, "Analysis of grounding grid of substation," in *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2017*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPCT.2017.8074259>
- [22] I. Kasim, S. Abduh, and N. Fitryah, "Grounding system design optimization on 275 KV betung substation based on IEEE standard 80-2000," in *QiR 2017 - 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017-Decem. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 400–407. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/QIR.2017.8168519>
- [23] M. D. Kavimandan and A. M. Silva, "Impacts of Existing Infrastructure on Soil Resistivity," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, vol. 2020-Octob, pp. 20–23, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9299899>
- [24] A. Raizer, W. Valente, and V. L. Coelho, "Development of a new methodology for measurements of earth resistance, touch and step voltages within urban substations," *Electric Power Systems Research*, vol. 153, pp. 111–118, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.025>
- [25] M. Abdaldaim, P. Wang, and L. Li, "The design of 110kV substation grounding grid with high resistivity soil," in *2017 IEEE 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP 2017 - Proceeding*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 1–3. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420847>
- [26] X. Wu, V. Simha, R. J. Wellman, M. Thakur, and S. S. Dimpfl, "Substation Grounding Study Input Parameter Sensitivity Analysis and Simulation Strategies," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 2272–2280. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2885475>
- [27] D. S. Gazzana, A. B. Tronchoni, R. C. Leborgne, M. Telló, and A. S. Bretas, "Numerical Technique to the Evaluation of Multiple Grounding Electrodes Coupled by the Soil in High Voltage Substations," in *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2019.8783554>
- [28] C. Gomes and M. Izadi, "Electrical Isolation of Two Earthing Systems under Lightning Conditions with TiO₂ Nano Fluid Barrier," *2019 15th International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2019*, no. October, pp. 1–5, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SIPDA47030.2019.8951640>
- [29] P. R. Bonda and M. K. Mishra, "Optimized Design of Earthing System for Substations with High Soil Resistivity and Limited Plot Area," in *2018 20th National Power Systems Conference, NPSC 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/NPSC.2018.8771780>
- [30] M. Salam, Q. Rahman, S. Ang, and F. Wen, "Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 290–297, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0153-8>
- [31] C. Cardoso, L. Rocha, A. Leiria, and P. Teixeira, "Validation of an integrated methodology for design of grounding systems through field measurements," in *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, 2017, pp. 897–901. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0452>

- [32] K. P. Sengar and K. Chandrasekaran, “Designing of cost minimum substation grounding grid system using DE, SCA, and HDESCA techniques,” *IET SCIENCE MEASUREMENT & TECHNOLOGY*, vol. 13, no. 9, pp. 1260–1267, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0021>
- [33] M. Campaña, P. Masache, E. Inga, and D. Carrión, “Estabilidad de tensión y compensación electrónica en sistemas eléctricos de potencia usando herramientas de simulación,” *Ingenius*, vol. 2, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.07>
- [34] M. H. Elmashtoly, H. I. Anis, and A. Emam, “Mitigating Hazardous Potentials Near Pipelines Using Passive Grounding Grids,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121 957–121 963, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109309>
- [35] L. Amaya and E. Inga, “Location of Harmonic Distortions in Electrical Systems using Compressed Sensing,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 24, no. 1, p. 15, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xA4zqI>
- [36] N. Permal, M. Osman, A. M. Ariffin, and M. Z. Abidin Ab Kadir, “Effect of non-homogeneous soil characteristics on substation grounding-grid performances: A review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11167468>
- [37] P. Musil, P. Mlynek, J. Slacik, and J. Pokorny, “Simulation-based evaluation of the performance of broadband over power lines with multiple repeaters in linear topology of distribution substations,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 19, pp. 1–24, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app10196879>
- [38] B. Anggoro, R. S. Utami, and L. Handayani, “Optimal Design of Grounding System Substation, Case Study : 275/150 kV Sigli Substation,” *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery, ICHVEPS 2019*, vol. 1, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011064>
- [39] X. Tian, Z. Lan, F. Huo, Z. Huang, S. Huang, Y. Ding, J. Geng, X. Yan, and Y. Liu, “Calculation of electric field on substation equipment considering AC Ion flow field,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/3914872>
- [40] Z. G. Datsios and P. N. Mikropoulos, “Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 36–44, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.016>
- [41] Z. Liu, W. Shi, and B. Zhang, “Numerical analysis of transient performance of grounding grid with lightning rod installed on multi-grounded frame,” *Energies*, vol. 14, no. 12, pp. 1–13, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14123392>
- [42] V. P. Androvitsaneas, K. D. Damianaki, C. A. Christodoulou, and I. F. Gonos, “Effect of soil resistivity measurement on the safe design of grounding systems,” *Energies*, vol. 13, no. 12, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13123170>
- [43] B. Kuchler, U. Schmidt, and J. Hänsch, “Harmonic current distribution in grounding systems of cabled medium voltage grids during single-pole ground fault,” *Energies*, vol. 14, no. 4, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14041110>
- [44] F. Sinchi-sinchi, C. Coronel-naranjo, A. Barragán-escandón, and F. Quizhpi-palomeque, “Soil Treatment to Reduce Grounding Resistance by Applying Low-Resistivity Material (LRM) Implemented in Different Grounding Systems Configurations and in Soils with Different Resistivities,” *Applied Sciences*, vol. 12, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app12094788>
- [45] F. Holik, L. H. Flå, M. G. Jaatun, S. Y. Yayilgan, and J. Foros, “Threat Modeling of a Smart Grid Secondary Substation,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, pp. 1–21, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11060850>