

**OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD
DE CONDUCTOR**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD
DE CONDUCTOR**

**AUTOR:
DAVID ROBERTO PEÑAFIEL TOLEDO**

**DIRECTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito, Enero 2019

David Roberto Peñafiel Toledo

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD DE CONDUCTOR

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2019

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



David Roberto Peñafiel Toledo (Y' 1990 – M'02). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Nacional Técnico “Vicente Rocafuerte” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en optimización multiobjetivo en sistemas de puesta a tierra para subestaciones de potencia considerando la longitud de conductor basado en la norma IEEE Std. 80-2013 basado en el método de Pareto para asignación de materiales.
dpenafielt@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y' 1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en Octubre de 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.
cbarrera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2019 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD DE CONDUCTOR*” realizado por David Roberto Peñafiel Toledo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., enero de 2019



.....

Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, David Roberto Peñafiel Toledo, con documento de identificación N° 1722061833, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: “*OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD DE CONDUCTOR*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., enero de 2019



.....
David Roberto Peñafiel Toledo
C.C.: 1722061833

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Sistemas de Puesta a Tierra.....	3
2.1.1	Función de una malla de puesta a tierra.	4
2.1.2	Requerimientos de una malla de puesta a tierra.....	4
2.2	Diseño de una Malla de Puesta a tierra	4
2.2.1	IEEE 80-2013.....	4
2.2.2	Determinación de la resistividad del terreno.....	4
2.2.3	Determinación de la corriente de cortocircuito monofásico	6
2.2.4	Calculo de la sección del conductor.....	6
2.2.5	Voltaje de malla y de paso	6
2.2.6	Voltaje de paso y toque tolerables	7
2.2.7	Resistencia de Malla	8
3	Optimización del sistema	8
3.1	Óptimo de Pareto.....	8
3.2	Modelación matemática de la función Multiobjetivo	9
3.3	Restricciones	9
4	Implementación del modelo matemático	9
4.1	Modelo de optimización en GAMS	10
5	Análisis de resultados.....	10
5.1	Caso de Estudio.....	11
5.1.1	Malla cuadrada.....	11
5.1.2	Malla rectangular	12
5.2	Comparación con ETAP	13
6	Conclusiones	13
6.1	Trabajos futuros	14
7	Referencias.....	14
7.1	Matriz de Estado del Arte	17
7.2	Resumen de Indicadores	19

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de Malla de Puesta a Tierra	3
Figura 2. Efecto de Resistividad del terreno	4
Figura 3. Mediciones de Resistencia Método de Wenner.....	5
Figura 4. Voltaje de Toque y Voltaje de Paso	7
Figura 5. Soluciones factibles de Pareto	8
Figura 6. Frente de Pareto optimo, maximizar y minimizar.	9
Figura 7. Ingreso de datos en ETAP para el diseño de malla cuadrada.....	11
Figura 8. Resultados obtenidos de ETAP para el diseño de malla cuadrada.....	11
Figura 9. Ingreso de datos en Programa de tesis para el diseño de malla cuadrada.....	12
Figura 10. Resultados obtenidos de Programa de tesis para el diseño de malla cuadrada	12
Figura 11. Ingreso de datos en ETAP para el diseño de malla rectangular	12
Figura 12. Resultados obtenidos de ETAP para el diseño de malla rectangular.....	12
Figura 13. Ingreso de datos en Programa de tesis para el diseño de malla rectangular ...	13
Figura 14. Resultados obtenidos de Programa de tesis para el diseño de malla rectangular.....	13
Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	19
Figura 16. Indicador de la formulación del problema – Estado del Arte.....	19
Figura 17. Indicador de solución – Estado del Arte.....	20

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos para Malla cuadrada.....	11
Tabla 2. Datos para Malla rectangular	12
Tabla 3. Comparación de Resultados de malla cuadrada.....	13
Tabla 4. Comparación de Resultados de malla rectangular.	13
Tabla 5. Matriz de estado del arte	17

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD DE CONDUCTOR

Resumen

Los sistemas de puesta a tierra son de gran importancia dentro del campo de la ingeniería eléctrica.

Permite controlar los potenciales frente a corrientes de fuga que circular por el terreno debajo de la subestación., el diseño de una malla de puesta a tierra está afectada por la terminología al usar las normas eléctricas. En la norma IEEE Std. 80-2013 se encuentran pasos a seguir para el diseño de una malla de puesta a tierra, sobredimensionando el conductor para cumplir con las restricciones impuestas desde el punto de vista técnico y de seguridad, logrando así un sistema confiable en caso de que exista una anomalía dentro de una subestación.

En este trabajo se desarrolla un algoritmo que minimiza la longitud de conductor para una malla de puesta a tierra, cumpliendo las restricciones que se encuentran en la norma, este algoritmo utiliza el método de Pareto enfocado en las problemáticas multiobjetivo, que permite minimizar la longitud de conductores y de varillas, sin transgredir los límites de voltajes descritos.

Palabras Clave: Sistema de puesta a Tierra, Voltaje de Toque, Voltaje de Paso, tierras homogéneas, método multiobjetivo, método de Pareto, varillas finitas.

Abstract

Grounding systems are of great importance in electrical engineering, they allow unwanted currents to escape to maintain the safety of the system to be protected, the design of a grounding grid is affected by the terminology when using the standards electrical, in the IEEE Std. 80-2013 standard there are steps to follow for the design of a grounding grid, oversizing the driver to comply with the imposed restrictions from the technical and safety point of view, thus achieving a system reliable in case there is an anomaly within a substation. In this work an algorithm is developed that minimizes the length of conductor for a grounding mesh, fulfilling the restrictions that are in the norm, this algorithm uses the Pareto method focused in the multiobjective problematic, that allows to minimize the conductor between bare conductor and rods, without transgressing the limits of voltages described.

Keywords: Grounding system, touch voltage, step voltage, homogeneous earth, multi-purpose method, Pareto method, finite rods.

1 Introducción

Los sistemas de puesta a tierra son esenciales para salvaguardar la integridad física de las personas y los equipos de una subestación, el tema de conexión al sistema de puesta a tierra es difícil; no por los conceptos inherentes descritos en la norma IEEE Std. 80, sino esencialmente a la equivocada representación de la terminología encontrada en aquella, en libros u otros escritos del tema [1][2].

La conexión normalmente se la realiza entre la parte metálica de equipos eléctricos, circuitos eléctricos o elementos metálicos no eléctricos del sistema eléctrico, a una malla o electrodos que normalmente se encuentran enterrados, con la finalidad evitar la exposición al riesgo de una descarga eléctrica crítica, a personas que se encuentren cercanas a la subestación, dirigiendo corrientes eléctricas a tierra en condiciones normales o de falla, sin rebasar los límites de operación de los equipos para y asegurar un funcionamiento continuo del sistema [3][4].

En un sistema de puesta a tierra, se considera las corrientes y voltajes debidas a las cargas, también se considera el efecto de las fallas que conlleva a sobre voltajes severos, este evento será más severo dependiendo del tipo de perturbación, la magnitud de falla, la duración del evento entre otros factores, que reducen drásticamente la vida útil del aislamiento del equipo y por ende el equipo, los esfuerzos que realizan los equipos están clasificadas en Permanentes de Frecuencia Industrial, Temporarias, Transitorias y Combinadas, los efectos de las corrientes eléctricas a frecuencias de 50 Hz y 60 Hz, el paso de corriente aproximadamente de 0.1 A puede ser letal para las personas [5].

La formulación de la duración de corriente que soporta la mayoría de personas se fundamenta en estudios, posteriormente se asume que un 99.5% de todas las personas tienen aproximadamente un peso de 50 kg y pueden sobrevivir a un golpe eléctrico, en un índole de 0.3s a 3.0s a una corriente, llamada corriente de fibrilación, se confiará en los dispositivos de operación rápida acoten el tiempo de duración de cualquier tipo de falla, el criterio para utilizar el tiempo en los relevadores primarios deben ser apropiados para los siguientes cálculos, se considera que la corriente tendrá la trayectoria por el cuerpo humano desde la mano hacia los pies o de un pie a otro, donde la mayor parte de esta corriente circula por órganos vitales [4][6].

Definida la corriente tolerable por el cuerpo humano con la cual se puede definir el voltaje tolerable total efectivo de un circuito accidental, estos voltajes tolerables son llamados voltaje de toque y voltaje de paso, la seguridad de la persona dependerá de la cantidad de energía absorbida por el cuerpo, entonces la definición de voltaje de toque es la diferencia de potencial que se genera entre potencial de superficie en un punto donde la persona se encuentra de pie, mientras sujeta un elemento metálico conectado con el sistema de puesta a tierra, el voltaje de paso se define como la diferencia de potencial que se genera en una superficie del terreno por una persona que tenga una separación aproximada de un metro entre los pies [7][8].

Para una operación satisfactoria del sistema de puesta a tierra se debe realizar las conexiones adecuadas para cada sistema en particular, los cuales deben tener convenientemente una resistencia de malla baja para disminuir el GPR (Ground Potential Rise), en subestaciones grandes la resistencia de malla es 4Ω o menor a

dicho valor, para lograr el objetivo de mantener un potencial cero en sistema de puesta a tierra o mantener el mismo potencial con respecto a tierra [4][9][10].

Para la modelación del sistema de puesta a tierra se toma en cuenta varios parámetros técnicos, para el desarrollo de un algoritmo genérico el software MATLAB es usado como herramienta computacional que permite mediante programación efectuar cálculos matemáticos, en los que se involucran matrices o condiciones lógicas

matemáticas, para el modelo de optimización, el software GAMS es empleado, este último utiliza un lenguaje algebraico (AML), gracias a su gran capacidad de resolver problemas con grandes cantidades de variables y restricciones, se dispone de forma sólida la estructuración de bloques de ecuaciones para abarcar todas las variables y restricciones de una forma eficiente [11][12][13].

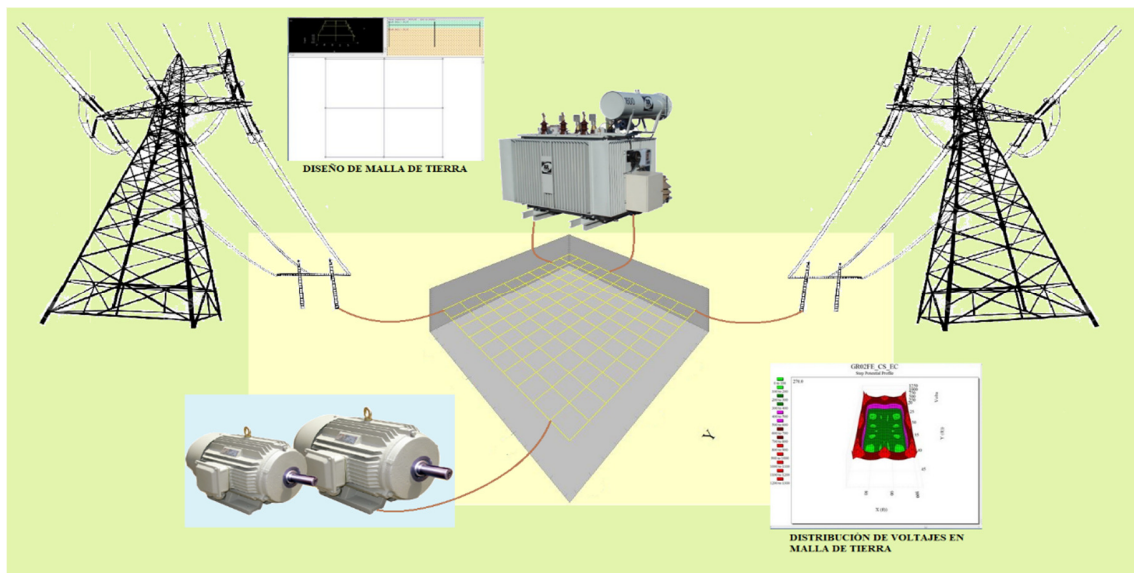


Figura 1. Diseño de Malla de Puesta a Tierra

2 Marco teórico

2.1 Sistemas de Puesta a Tierra

Todos los sistemas eléctricos deben tener un sistema de protección contra eventos inesperados que puedan producir una falla, dependiendo de la falla se pueden producir diferentes corrientes, esto provocará que los equipos sean sometidos a diferentes esfuerzos con diferentes duraciones de voltaje a frecuencia industrial o de frecuencias armónicas y sub armónicas [1][14].

La conexión a tierra ha tenido grandes avances desde el siglo pasado, tomando a

la tierra como un retorno para asegurar un circuito cerrado dentro de un sistema eléctrico.

En la actualidad se tienen tres elementos fundamentales para un sistema de conexión a tierra, la interface con la malla de puesta a tierra, las uniones de los equipos y el sistema eléctrico y la distribución de la tierra, en condiciones normales estos elementos no están sujetos a grandes voltajes, cuando existe una falla es fundamental que todos los puntos de instalación eléctrica, equipos eléctricos y estructuras metálicas tengan una conexión

a tierra para mayor seguridad [1][2][15][16].

2.1.1 Función de una malla de puesta a tierra.

La principal función de una malla de puesta a tierra es proteger al personal, equipos y estructuras, cuando se suscite una falla eléctrica, teniendo en cuenta los conceptos principales de la máxima corriente que puede soportar un ser humano.

Otra función de la malla de puesta a tierra, debe eliminar la corriente producida por una anomalía de una manera rápida y fácil, para ello se diseña con una baja impedancia para asegurar y mejorar el correcto funcionamiento de las protecciones eléctricas [1][17][18].

2.1.2 Requerimientos de una malla de puesta a tierra.

Para obtener una alta confiabilidad en un sistema eléctrico, se debe diseñar idóneamente una malla de puesta a tierra que cumpla con los siguientes hitos:

- La reactancia de la malla debe ser muy baja tal que el sistema se considere resistivo y se considere sólidamente puesto a tierra [19].
- La malla debe conducir las corrientes de falla sin producir puntos calientes dentro del sistema de puesta a tierra.
- Durante una falla no se deben producir gradientes de potencial que afecten a sistemas de puesta a tierra cercanos.
- El sistema debe estar preparado para las más severas condiciones ambientales a que se expongan conductores y varillas.

2.2 Diseño de una Malla de Puesta a tierra

2.2.1 IEEE Std. 80-2013

La norma IEEE Std. 20-2013, es una guía que está centrada en subestaciones eléctricas, como subestaciones tipo GIS y convencional, esta norma también abarca a subestaciones de transmisión y distribución, la guía procura orientar e informar acerca de la seguridad de conexiones en el diseño de una malla de puesta a tierra de corriente alterna [20].

Esta guía se basa principalmente en frecuencias de 50-60 Hz, establece los límites de seguridad de voltaje que el cuerpo humano puede resistir en condiciones de falla, proporcionando un procedimiento de seguridad para un diseño seguro [1][2].

2.2.2 Determinación de la resistividad del terreno.

Para determinar la resistividad del terreno, se toma al suelo como medio de aterrizaje, todos los tipos de suelos se comportan como un conductor, entonces es posible realizar mediciones de resistencia del suelo y calcular la resistividad del suelo [21][22][23].

La resistividad del terreno varía considerablemente con ciertos factores, en la figura 2 se tiene las relaciones ambientales:

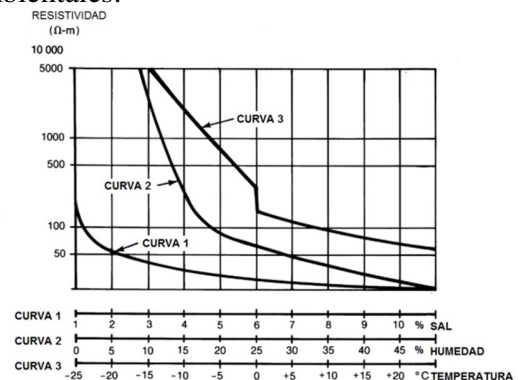


Figura 2. Efecto de Resistividad del terreno

El método de Wenner para mediciones de resistividad del terreno, se lo realiza

inyectando una corriente cualquiera de los pares de electrodos más externos, a la misma profundidad y distancia como se muestra en la figura 3 [2][24].

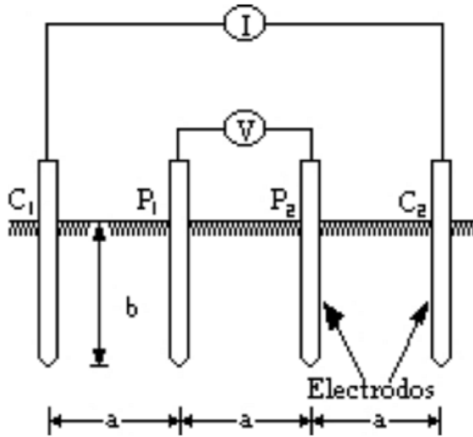


Figura 3. Mediciones de Resistencia Método de Wenner IEEE 80

Esta es la técnica de medición más utilizada, de la cual se obtiene la siguiente ecuación:

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

Donde:

ρ_a Resistividad del Suelo.

R Resistencia del suelo.

a Distancia entre picas.

b Longitud enterrada de la pica.

Si la distancia entre los electrodos, es muy grande tal que a sea mayor a b , la ecuación se puede reducir a:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (2)$$

Donde:

ρ_a Resistividad del suelo.

R Resistencia del suelo.

a Distancia entre picas.

La profundidad es otro factor a considerar, la resistividad varía verticalmente, dependiendo de la

compactación y estratificación del suelo [1][2][15]. La norma IEEE Std. 80 propone tres modelos para el cálculo de la resistividad de suelo y son:

a) *Modelo de suelo uniforme:*

Se utiliza cuando la resistividad de las medidas del terreno tiene una variación mínima y en condiciones de suelo homogéneo, la ecuación de este modelo es la siguiente:

$$\rho_{aprox} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n} \quad (3)$$

Donde:

ρ_{aprox} Resistividad aproximada del terreno.

ρ_n Resistividad.

n Numero de estratos.

b) *Modelo de suelo de 2 capas:*

Este modelo determina las condiciones reales del terreno, que consiste de una capa superior y una inferior la primera finita y la segunda infinita, esta puede describirse por el factor de reflexión K y está definido por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (4)$$

Donde:

k Factor de reflexión entre diferentes capas de suelo..

ρ_1 Resistividad de la capa superior.

ρ_2 Resistividad de la capa inferior.

c) *Modelo de suelo multicapa*

Este modelo tiene varias capas horizontales o capas verticales, para la medición de la resistividad en este tipo de suelo, se lo realiza con programas computacionales [22][25].

2.2.3 Determinación de la corriente de cortocircuito monofásico

La determinación de la corriente de circuito monofásico o corriente de falla se presenta cuando existe un enlace, accidental o intencional entre el conductor de fase y tierra, el cálculo de la corriente de corto circuito se considera el sitio dentro de la subestación donde ocurre la falla, esta corriente de falla a tierra o monofásica está dada por la siguiente ecuación [20][26].

$$I_G = I_F D_f S_f \quad (5)$$

Donde:

I_G Corriente de corto circuito monofásica.

I_F Corriente de falla.

D_f Factor de decremento IG.

S_f Factor de divisor de corriente.

IG se considera el valor máximo de corriente de falla que fluirá a través de la malla de tierra en una subestación, se debe mencionar que todas las mallas de puesta a tierra deben ser interconectadas para mantener una malla equipotencial [6].

2.2.4 Cálculo de la sección del conductor

Los conductores que formarán la malla de puesta a tierra, se determina con la corriente de falla, la sección mínima se la calcula con la siguiente ecuación:

$$A_{mm2} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) \ln \left[\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right]}} \quad (6)$$

Donde:

A_{mm2} Sección del conductor.

I Corriente rms.

$TCAP$ Capacidad térmica del por unidad de volumen del conductor.

t_c	Duración de la falla.
α_r	Coefficiente térmico de resistividad a temperatura referencial.
ρ_r	Resistividad del conductor de tierra a la temperatura referencial.
k_o	Coefficiente de cálculo.
T_m	Temperatura máxima permisible.
T_a	Temperatura ambiente.

El dimensionamiento del conductor está dado por el límite térmico del conductor y parámetros ambientales definidos en condiciones normales de operación [2][15][22].

2.2.5 Voltaje de malla y de paso

El voltaje de malla y el voltaje de paso, que se aproximan a los valores reales en una subestación están dados por coeficientes que toman en cuenta algunos errores en el cálculo de estos voltajes [2].

a) Voltaje de Malla

Para el cálculo del voltaje de malla se toma en cuenta el coeficiente geométrico y el coeficiente de corrección, estos consideran que la corriente de malla no se distribuye proporcionalmente, tiende una mayor densidad de corriente en las esquinas de la malla, está dada por [1][2].

$$E_m = \frac{\rho * K_i + K_m + I_G}{L_m} \quad (7)$$

Donde:

E_m Voltaje de Malla.

ρ Resistividad del terreno.

K_i Factor de corrección geométrico.

K_m Factor de espaciamiento voltaje de malla.

I_G Corriente de corto circuito monofásica
 L_M Longitud efectiva de conductor para Em.

b) *Voltaje de Paso*

El voltaje de paso también toma en cuenta el coeficiente geométrico, el coeficiente de corrección, con la siguiente ecuación [1][26]

$$E_s = \frac{\rho * K_i + K_s + I_G}{L_s} \quad (8)$$

Donde:

E_s Voltaje de Paso.
 ρ Resistividad del terreno.
 K_i Factor de corrección geométrico.
 K_s Factor de espaciamento voltaje de paso.
 I_G Corriente de corto circuito monofásica
 L_s Longitud efectiva de conductor para Es.

2.2.6 Voltaje de paso y toque tolerables

El voltaje tolerable por una persona dentro de una subestación está en función del peso corporal de 50 kg y 70 kg, la cantidad de absorción de energía en el cuerpo, y la duración de la falla, en base a diferentes puntos y formas de contacto como se ilustra en la figura 4 [2].

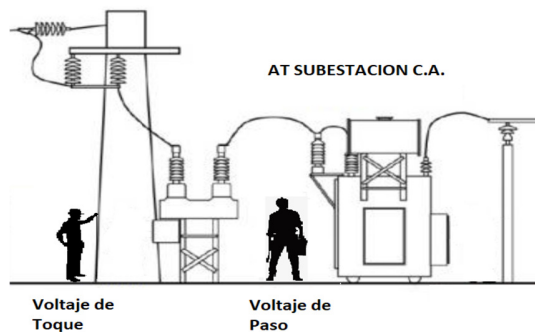


Figura 4. Voltaje de Toque y Voltaje de Paso

a) *Voltaje de Toque*

El voltaje de toque es el potencial que se presenta cuando la persona está en contacto con un elemento metálico y circula una corriente desde el apoyo hasta los pies, el voltaje de toque permisible está dada por:

$$E_{t50} = \frac{(1000 * 1.5 * C_s * \rho_s) * 0.116}{\sqrt{t_c}} \quad (9)$$

$$E_{t70} = \frac{(1000 * 1.5 * C_s * \rho_s) * 0.157}{\sqrt{t_c}} \quad (10)$$

Donde:

E_{t50} Voltaje de toque permisible para 50 kg.
 E_{t70} Voltaje de toque permisible para 70 kg.
 C_s Factor de decremento de capa superficial.
 ρ_s Resistividad de capa superficial.
 t_c Duración de la falla.

b) *Voltaje de Paso*

El voltaje de paso es el potencial que se genera por el contacto simultáneamente en 2 puntos del terreno por una persona en una subestación,

$$E_{s50} = \frac{(1000 * 6 * C_p * \rho_s) * 0.116}{\sqrt{t_c}} \quad (11)$$

$$E_{s70} = \frac{(1000 * 1.5 * C_p * \rho_s) * 0.157}{\sqrt{t_c}} \quad (12)$$

Donde:

E_{t50} Voltaje de paso permisible para 50 kg.
 E_{t70} Voltaje de paso permisible para 70 kg.
 C_s Factor de decremento de capa superficial.
 ρ_s Resistividad de capa superficial.
 t_c Duración de la falla.

Estos voltajes que se presentan en la superficie de la subestación eléctrica no deben ser superiores a los voltajes de malla y de paso [1][5][16].

2.2.7 Resistencia de Malla

La resistencia de malla está en función del área de la subestación, la profundidad de enterrado y la longitud total de conductor que se calcula con la siguiente ecuación [8][23][27].

$$L_T = N_r L_r + (D_x L_x + D_y L_y) \quad (13)$$

Donde:

- L_T Longitud efectiva del conductor del sistema.
- L_C Longitud efectiva del conductor.
- L_R Longitud efectiva de las varillas.

En los sistemas de mallas a tierra, la resistencia del terreno, se la calcula con la siguiente ecuación:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (14)$$

Donde:

- R_G Resistencia de malla.
- ρ Resistividad del terreno.
- L_T Longitud efectiva del conductor del sistema.
- A Área del terreno.
- h Profundidad de la malla.

Una baja resistencia del terreno, minimiza el GPR, la resistencia para una subestación eléctrica usualmente se encuentra en un rango entre 1 Ω y 5 Ω , la resistencia de malla [1][7].

3 Optimización del sistema

Para optimizar el sistema se tomará en cuenta la longitud total del conductor. Formado por las longitudes de los conductores horizontales y las longitudes de las varillas verticales, generando más de una función objetivo, esta es una representación matemática de un sistema complejo se la llama optimización multiobjetivo [4][28].

3.1 Óptimo de Pareto

El óptimo de Pareto es un modelo matemático que establece la asignación óptima de materiales, este se utiliza para analizar posibles soluciones óptimas, dadas a una variedad de objetivos, en un amplio conjunto de posibilidades como se muestra en la figura 5 [29].

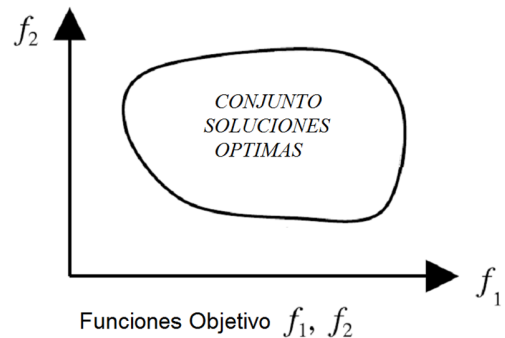


Figura 5. Soluciones factibles de Pareto

Entonces el óptimo de Pareto es una solución a un problema de multiobjetivo, y este establece varias soluciones que satisfacen a restricciones impuestas en el modelo [30]. Dentro del óptimo de Pareto se encuentra el denominado Edgeworth-Pareto, este busca un punto óptimo de asignación de materiales, siempre que la solución no afecte a las restricciones impuestas en el modelo, cumpliendo el maximizar o minimizar el modelo como en la figura 6 [3][30][31].

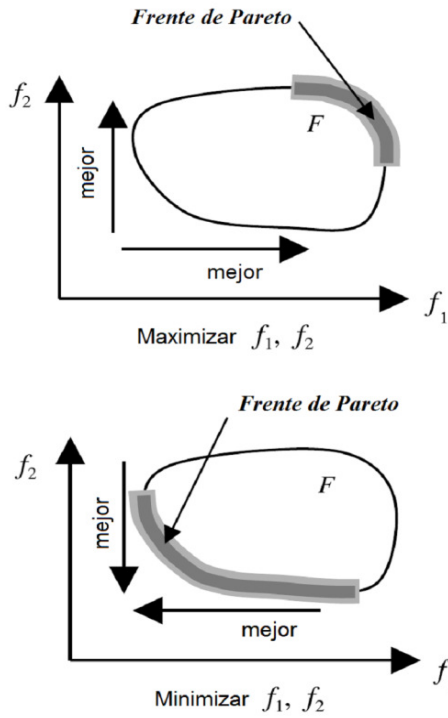


Figura 6. Frente de Pareto óptimo, maximizar y minimizar.

3.2 Modelación matemática de la función Multiobjetivo

Un modelo multiobjetivo se formula partiendo de un problema que tiene varios objetivos que se debe cumplir sin que exista conflicto entre ellos, este implica una serie de funciones objetivo a ser optimizadas, el cual debe llegar a un punto eficiente [3][30].

La planeación de un modelo multiobjetivo está dada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar/Maximizar} \\ & \vec{f}_k(\vec{X}), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (16) \\ & \text{Sujeto a:} \\ & g_i(\vec{X}) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, o \\ & h_j(\vec{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ & \vec{X} \in R \end{aligned}$$

Donde:
 $\vec{f}_k(\vec{X})$ Vector de Funciones objetivo.

3.3 Restricciones

Las restricciones están modeladas como igualdades o desigualdades matemáticas,

que limita algún proceso o consumo de un material para una o varias funciones objetivo [30][32].

$$g_i(\vec{X}) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, o \quad (17)$$

$$h_j(\vec{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (18)$$

Donde:

$g_i(\vec{X})$ Restricción 1.

$h_j(\vec{X})$ Restricción 2.

i Variable 1.

j Variable 2.

Estas restricciones dependen de un dominio llamado espacio de búsqueda, en este se encuentra soluciones satisfactorias para dicha función objetivo [3][30].

4 Implementación del modelo matemático

La ecuación (19) muestra el modelo multiobjetivo que garantiza minimizar la longitud total del conductor en una malla de puesta a tierra [3][28][30].

$$\overline{FMO} = \min(\overline{L_C} + \overline{L_{R_j}}) \quad (19)$$

Donde:

FMO Función multiobjetivo.

L_C Longitud total del Conductor

L_R Longitud total de Varillas.

Para optimizar el sistema de puesta a tierra, se tienen dos funciones objetivo que se muestran en las ecuaciones (20) y (21), la primera está atada al conductor desnudo y la segunda a las varillas de la malla [3].

$$\overline{L_C} = \sum_{i=1}^n D_{xi} * L_x + \sum_{j=1}^m D_{yj} * L_y \quad (20)$$

$$\overline{L_{R_j}} = \sum_{k=1}^p N_{rk} * L_r \quad (21)$$

Donde:

- L_C Longitud total del Conductor
- L_R Longitud total de Varillas.
- N_{rk} Número de varillas.
- L_r Longitud de la varilla.
- D_{xi} Número de conductores paralelos en el eje X.
- L_X Longitud de conductor en X.
- D_{yj} Número de conductores paralelos en el eje Y.
- L_y Longitud de conductor en Y.

Estas funciones objetivo están obligadas a cumplir niveles específicos de voltaje (voltaje tolerable de toque y Voltaje tolerable de paso), que puede soportar cuerpo humano, y comparándolos con los niveles de voltaje de la malla de puesta a tierra (voltaje de malla y voltaje de paso), para un buen sistema de puesta a tierra se sobredimensiona la longitud del conductor para cumplir la normativa técnica, la selección de la cantidad apropiada de conductor se pondera como un proceso de optimización, las restricciones para este proceso se muestra desde la ecuación (22) hasta la ecuación (26) [30][32].

$$2 < N_x \quad (22)$$

$$2 < N_y \quad (23)$$

$$4 < N_r \quad (24)$$

$$E_m < X * E_T \quad (25)$$

$$E_s < X * E_{ST} \quad (26)$$

Durante los últimos años se ha mejorado los diseños para la reducción de materiales en la construcción cumpliendo los niveles de seguridad.

4.1 Modelo de optimización en GAMS

A continuación, se detalla el método de minimización del modelo multiobjetivo del problema a ser resuelto:

Algoritmo Multiobjetivo

Paso 1:

Ingreso de Datos del sistema.

Paso 2:

Dimensionar el conductor

Paso 3:

Establecer voltajes de toque tolerables para 50 kg y 70 kg

Etoque50, Etoque70

Epasso50, Epasso70

Paso 4:

Diseño básico inicial

Área del terreno, número de conductores en el eje X y eje Y, número de varillas, profundidad de malla

Paso 5:

Resistencia de malla

$$1\Omega < R_g < 5\Omega$$

Paso 6:

Determinación de la corriente monofásica de falla

Paso 7:

Definir las variables para el proceso de optimización del diseño y definir las funciones objetivo.

Paso 8:

Minimizar el modelo multiobjetivo

$$\overrightarrow{FMO} = \min(\overrightarrow{L_{Cl}} + \overrightarrow{L_{RJ}})$$

Paso 9:

Definir límites de conductores en el eje X y en el eje Y

Definir las restricciones de desigualdad

$$2 < N_x$$

$$2 < N_y$$

$$4 < N_r$$

$$E_m < X * E_t$$

$$E_m < X * E_t$$

Establecer los valores mínimos de las variables

Paso 10:

Comparación de voltajes tolerables con voltajes de malla

$$E_m < E_t$$

$$E_s < E_{st}$$

Paso 11:

Visualización de resultados

Paso 12:

FIN

Una vez que se obtengan los nuevos valores, resultado del proceso de optimización se procede a la comparación con los casos de estudio indicados en IEEE Std. 80-2013 [1].

5 Análisis de resultados

Para medir el resultado del proceso de optimización, se realizan varias simulaciones que permitan comparar los

resultados con el programa ETAP, las primeras simulaciones sirven para determinar un buen diseño de una malla de puesta a tierra, una vez que el diseño cumpla las condiciones de voltajes tolerables del cuerpo humano.

Luego se aplica el algoritmo que logra optimizar el diseño de la longitud del conductor de un diseño de malla a tierra.

La comparación que se realiza con los programas mencionados, permite determinar la longitud óptima de conductor desnudo y el número de varillas a instalarse.

5.1 Caso de Estudio

Dentro de la norma IEEE Std. 80-2013 se encuentran dos casos de estudio, el primero es una malla cuadrada con varillas y el segundo es una malla rectangular con varillas.

5.1.1 Malla cuadrada

Para el siguiente caso se disponen los siguientes datos de entrada que se muestran en la tabla 1, los datos sirven para todas las simulaciones de este caso.

Tabla 1. Datos para Malla cuadrada

Datos de entrada para cálculo de Malla cuadrada con varillas.		
Corriente de Falla monofásica	3.18	[kA]
Factor de División de corriente	0.6	-
Factor de decremento	1	-
Duración de la falla	0.5	[s]
Resistividad del suelo	400	[$\Omega \cdot m$]
Resistividad de la grava	2500	[$\Omega \cdot m$]
Espesor de superficie de grava	0.102	[m]
Profundidad de la malla de tierra	0.5	[m]
Longitud del eje X de malla	70	[m]
Longitud del eje Y de malla	70	[m]
Numero de varillas	63	-

En la figura 7 se indica el ingreso de datos en el programa ETAP.

Figura 7. Ingreso de datos en ETAP para el diseño de malla cuadrada

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	823.5	840.5
Step	554.5	2696.1
GPR	5307.1 Volts	Rg 2.752 Ohm

Figura 8. Resultados obtenidos de ETAP para el diseño de malla cuadrada

La figura 8 muestra los resultados obtenidos y se puede apreciar que cumplen con las restricciones que especifica la norma para los voltajes tolerables por el cuerpo humano.

Figura 9. Ingreso de datos en Programa de tesis para el diseño de malla cuadrada

Figura 10. Resultados obtenidos de Programa de tesis para el diseño de malla cuadrada

En la figura 9 se aprecia el ingreso de los datos para el diseño de la malla cuadrada y la figura 10 muestra los resultados obtenidos después de aplicar el algoritmo de optimización.

5.1.2 Malla rectangular

Para la simulación de la malla rectangular se tienen los siguientes datos que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos para Malla rectangular

Datos de entrada para cálculo de Malla cuadrada con varillas.		
Corriente de Falla monofásica	3.18	[kA]
Factor de División de corriente	0.6	-
Factor de decremento	1	-
Duración de la falla	0.5	[s]
Resistividad del suelo	400	[$\Omega \cdot m$]
Resistividad de la grava	2500	[$\Omega \cdot m$]
Espesor de superficie de grava	0.102	[m]
Profundidad de la malla de tierra	0.5	[m]
Longitud del eje X de malla	63	[m]

Longitud del eje Y de malla	84	[m]
Numero de varillas	158	-

En la figura 11 se observa el ingreso de datos en el programa ETAP, para el diseño de la malla rectangular.

Figura 11. Ingreso de datos en ETAP para el diseño de malla rectangular

Result Summary	
Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch: 665.3	840.5
Step: 459.4	2696.1
GPR: 5037.7 Volts	Rg: 2.613 Ohm

Figura 12. Resultados obtenidos de ETAP para el diseño de malla rectangular

En la figura 12 se muestra los resultados obtenidos de la simulación del diseño en ETAP, cumpliendo las restricciones de voltajes tolerables para el cuerpo humano.

Figura 13. Ingreso de datos en Programa de tesis para el diseño de malla rectangular

Figura 14. Resultados obtenidos de Programa de tesis para el diseño de malla rectangular

En la figura 13, son ingresados los datos para la simulación de la malla rectangular, en la figura 14 se encuentran los datos del diseño utilizando el algoritmo de optimización, para proceder a realizar las comparaciones de los casos.

5.2 Comparación con ETAP

Se puede apreciar en la tabla 3 para el diseño de la malla cuadrada y la tabla 4 para el diseño de la malla rectangular, los resultados de los diseños obtenidos mediante el programa cumplen las restricciones de voltajes tolerables por el cuerpo humano.

Tabla 3. Comparación de Resultados de malla cuadrada.

Comparación de resultados con ETAP		
	ETAP	PROGRAMA
Voltaje de Malla	823.5	819.2
Voltaje de Paso	554.5	574.7
Número de conductores en X	11	10
Número de conductores en Y	11	10
Número de Varillas	63	39
Resistencia de Malla	2.61	2.65

Tabla 4. Comparación de Resultados de malla rectangular.

Comparación de resultados con ETAP		
	ETAP	PROGRAMA
Voltaje de Malla	665.3	819.5
Voltaje de Paso	459.1	661.8
Número de conductores en X	10	7
Número de conductores en Y	13	9
Número de Varillas	158	115
Resistencia de Malla	2.75	2.76

Se observa que después de aplicar el algoritmo de optimización que se reduce la cantidad de conductor, logrando así un diseño cuasi-óptimo de una malla de puesta a tierra para los casos de análisis propuestos.

6 Conclusiones

Para la minimización de materiales existen varios métodos que solucionan la problemática, el método de Pareto permite obtener un punto donde las funciones objetivo no obtengan una mayor relevancia, en síntesis, ninguna está afectado a la otra, obteniendo una mejor distribución de los materiales.

El modelo implementado para minimizar la longitud de conductor de una malla de puesta a tierra, puede ser utilizado para modelos de subestaciones eléctricas, un buen diseño de la malla regularmente es sobredimensionado, esto permite que los sobre voltajes no afecten la seguridad del personal y los equipos de la subestación.

Aplicando el algoritmo diseñado, se logra obtener una minimización de la longitud del conductor, sin afectar los límites establecidos de voltaje de toque y voltaje de paso tolerables por el cuerpo humano, cumpliendo con los objetivos propuestos en el presente trabajo.

6.1 Trabajos futuros

Para trabajos futuros que se los puede realizar como trabajos de pregrado, se recomienda desarrollar los siguientes tópicos:

- Realizar un modelo que permita asignar valores de costos a las funciones objetivo y lograr una optimización en función de costos de construcción.
- Incorporar una función objetivo que permita optimizar la profundidad efectiva de la malla de puesta a tierra.
- Complementar el programa con un modelo de mantenimiento de la malla, en los puntos de conexiones de conductor y varillas.

7 Referencias

- [1] S. Committee, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. 2013.
- [2] C.-H. Lee and S. Meliopoulos, "Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479-1," 1999.
- [3] K. A. Vyas and J. G. Jamnani, "Optimal Design of Grounding System for HV / EHV Substations in Two Layered Soil," vol. 2, no. 5, 2012.
- [4] J. Nahman, D. Eng, D. Sc, and N. Mijuskovic, "Optimisation of earthing grids," 1979.
- [5] H. Dehbonei, "Power System Earthing – Its Commissioning and Test Errors," 2016.
- [6] T. Han, B. Du, Y. Gao, and Y. Xia, "Partial Discharge Pattern Recognition Based on Transient Earth Voltage for 10 kV Switchgear in Smart Grid," no. c, pp. 1–4, 2012.
- [7] S. D. Buba, W. F. W. Ahmad, M. Z. A. A. Kadir, C. Gomes, J. Jasni, and M. Osman, "Design of Distribution Substation Earth Grid in High Resistivity Soil Using CDEGS," 2014.
- [8] V. N. Manohar and R. P. Nagar, "DESIGN OF STEEL EARTHING GRIDS IN INDIA," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. 6, 1979.
- [9]. R.M. & K. Rajaratnam Huey, "IDENTIFICATION OF ELECTRICAL PARAMETERS IN LARGE EARTH GRIDS," 1973.
- [10] A. L. KINYON, "Earth Resistivity Measurements for Grounding Grids," p. 18, 1961.
- [11] K. A. Vyas and J. G. Jamnani, "MATLAB GUI Development Environment Simplifies Deployment of Standalone Software for Optimal Design of Substation Grounding Systems," 2012.
- [12] A. A. El-fergany and S. Member, "DESIGN AND OPTIMIZE SUBSTATION GROUNDING GRID BASED ON IEEE STD. 80 -2000 USING GUI AND MATLAB CODES," 2011.
- [13] M. Nassereddine, J. Rizk, A. Hellany, and M. Nagrial, "HV substation earth grid commissioning using current injection test (CIT) method," pp. 67–72, 2013.
- [14] H. D. Kurniawan and A. B. Suksmono, "A compressive-sampling Stepped-Frequency

- Continuous Wave sodar system,” *Proceeding 2016 10th Int. Conf. Telecommun. Syst. Serv. Appl. TSSA 2016 Spec. Issue Radar Technol.*, pp. 2–5, 2017.
- [15] A. J. Datta, R. Taylor, and G. Ledwich, “Earth grid safety criteria determination with the standards IEEE-80 and IEC-60479 and optimization of installation depth,” in *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference: Challenges for Future Grids, AUPEC 2015*, 2015.
- [16] A. Ackerman, P. K. Sen, and C. Oertli, “Designing safe and reliable grounding in AC substations with poor soil resistivity: An interpretation of IEEE Std. 80,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2013.
- [17] A. J. Datta, R. Taylor, and G. Ledwich, “Earth grid safety criteria determination with the standards IEEE-80 and IEC-60479 and optimization of installation depth,” in *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference: Challenges for Future Grids, AUPEC 2015*, 2015.
- [18] K. Dehghanpour, H. Nehrir, J. Sheppard, and N. Kelly, “Agent-Based Modeling of Retail Electrical Energy Markets With Demand Response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [19] Y. Xu, C.-C. Liu, K. Schneider, F. Tuffner, and D. Ton, “Microgrids for Service Restoration to Critical Load in a Resilient Distribution System,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [20] S. M. Shahrtash and N. Ramezani, “A novel method to determine earth fault split factor for grounding grid design of HV substations,” in *2006 International Conference on Power System Technology, POWERCON2006*, 2007.
- [21] S. Huang, Z. Fu, Q. Wang, X. Zhu, and S. Qin, “Service life estimation for the small- and medium-sized earth grounding grids,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015.
- [22] P. Calixto, “Soil Resistivity Measurement: Two-Layer Model, Proposed Revisions to IEEE Standard 80-2000 and IEEE Standard 81-1983,” 2002.
- [23] D. Mukhedkar and P. H. Reynolds, “Earth-return mutual coupling effects in ground resistance measurements of extended grids,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 6, pp. 1850–1857, 1983.
- [24] R. D. E. Una and M. A. Tierra, “CALCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN,” no. 22, pp. 37–42, 2003.
- [25] M. Pucci, G. Vitale, G. Cirrincione, and M. Cirrincione, “Parameter identification of a Double-Layer-Capacitor 2-branch model by a least-squares method,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 6770–6776, 2013.
- [26] S. Yu and B. Yu, “Investigation on earthing of low-voltage grid,” in *2008 China International Conference on Electricity Distribution, CIGED 2008*, 2008.
- [27] H. E. Martínez, E. L. Fuentealba, L. A. Cisternas, H. R. Galleguillos, J. F. Kasaneva, and O. A. De La Fuente, “A new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 601–608, 2004.
- [28] S. Slesongsom, “Multiobjective Optimization with Even Pareto

- Filter,” vol. 1, no. 1, pp. 92–96, 2008.
- [29] F. Dawalibi and M. Ieee, “OPTIMUM DESIGN OF SUBSTATION GROUNDING IN A TWO LAYER EARTH STRUCTURE,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. 2, 1975.
- [30] U. Bharambe, S. S. Durbha, K. Kurte, N. H. Younan, R. L. King, and M. State, “PARETO OPTIMIZATION FOR MULTIOBJECTIVE MATCHING OF,” pp. 1159–1162, 2013.
- [31] K. W. Deronne and G. Karypis, “Pareto Optimal Pairwise Sequence Alignment,” vol. 10, no. 2, pp. 481–493, 2013.
- [32] Z. He, X. Wen, and J. Wang, “Optimization design of substation grounding grid based on genetic algorithm,” *Proc. - Third Int. Conf. Nat. Comput. ICNC 2007*, vol. 4, no. 7, pp. 140–144, 2007.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 5. Matriz de estado del arte

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES DE POTENCIA CONSIDERANDO LA LONGITUD DE CONDUCTOR																							
ITEM	AÑO	TITULO DEL ARTICULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Sistema de puesta a tierra	Voltaje de toque tolerable	Voltaje de Paso tolerable	Voltajes de malla de puesta a tierra	Método de Pareto	Dimensionamiento de longitud del conductor	Resistencia de malla de puesta a tierra	Límite de voltaje de malla tolerable	Límite de voltaje de paso tolerable	Voltaje de toque de malla de puesta a tierra	Voltaje de paso de malla de puesta a tierra	Número de conductores en eje X y Eje Y	Numero de varillas	Algoritmo Multiobjetivo	Método de Pareto	Fronteras de Pareto	Óptimo denominado Edgeworth-Pareto	Modelamiento de malla de puesta a tierra	Minimización de longitud de conductor	Resistencia de malla de puesta a tierra
1	2013	Ieee guide for safety in ac substation grounding	76	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
2	2011	a hybrid evolutionary algorithm for finding pareto optimal set in multi-objective optimization	2	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	
3	2004	a new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode	57	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
4	2007	a novel method to determine earth fault split factor for grounding grid design of hv substations	1	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	
5	2003	calculo de la malla de puesta a tierra de una subestación	2	☒	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
6	2014	circuit representation of coupled earthing grids	0	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
7	1999	comparison of touch and step voltages between ieee std 80 and iec 479-1	13	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	
8	2011	design and optimize substation grounding grid based on ieee std. 80 -2000 using gui and matlab codes	2	☒	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
9	2014	design of distribution substation earth grid in high resistivity soil using CDEGS	1	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
10	1979	design of steel earthing grids in india	11	☒	☐	☐	☒	☐	☒	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

11	2013	designing safe and reliable grounding in ac substations with poor soil resistivity: an interpretation of ieee std. 80	0	⊗	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□
12	2015	earth grid safety criteria determination with the standards ieee-80 and iec-60479 and optimization of installation depth	0	⊗	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□
13	1961	earth resistivity measurements for grounding grids	0	□	□	□	⊗	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□
14	1983	earth-return mutual coupling effects in ground resistance measurements of extended grids	4	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□
15	2014	effect of earth grid conductor spacing on the safety criteria of substation earthing	0	□	⊗	⊗	□	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	□	⊗	□	□	□	□	⊗	□	□
16	2013	hv substation earth grid commissioning using current injection test (cit) method	0	⊗	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□
17	1973	identification of electrical parameters in large earth grids	5	□	⊗	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	□	□	□	□	□	□	⊗
18	2008	investigation on earthing of low-voltage grid	1	⊗	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	□	⊗	□	⊗	□	□
19	2012	matlab gui development environment simplifies deployment of standalone software for optimal design of substation grounding systems	0	⊗	□	□	□	□	□	□	⊗	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	⊗
20	2012	methodology and technology for power system grounding	1	⊗	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	□	□	□	□	⊗	□	□
21	2008	multiobjective optimization with even pareto filter	1	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	⊗	⊗	⊗	□	□	□	□
22	2012	optimal design of grounding system for hv / ehv substations in two layered soil	0	□	□	⊗	□	□	□	□	⊗	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□	⊗	□
23	1979	optimisation of earthing grids	2	⊗	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	□	□	□	□	⊗	□	⊗
24	2007	optimization design of substation grounding grid based on genetic algorithm	1	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	⊗	□	□	□	□	□	⊗	□	□	□	⊗	□	□
25	1975	optimum design of substation grounding in a two layer earth structure	27	⊗	⊗	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□
26	2013	pareto optimal pairwise sequence alignment	4	□	□	□	□	⊗	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	⊗	⊗	⊗	□	⊗	□	□
27	2013	Pareto optimization for multiobjective matching of geospatial ontologies	0	□	□	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	⊗	□	⊗	□	□
28	2012	partial discharge pattern recognition based on transient earth voltage for 10 kv switchgear in smart grid	0	⊗	□	□	⊗	□	□	□	□	□	⊗	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗
29	2016	power system earthing – its commissioning and test errors	1	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	□
30	2015	service life estimation for the small- and medium-sized earth grounding grids	0	□	⊗	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗	⊗
31	2002	soil resistivity measurement: two-layer model, proposed revisions to ieee standard 80-2000 and ieee standard 81-1983	1	⊗	□	□	⊗	□	□	⊗	⊗	□	□	⊗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	⊗
CANTIDAD:				17	6	6	12	4	6	4	7	6	6	6	4	5	6	5	3	5	6	11	5	9

7.2 Resumen de Indicadores

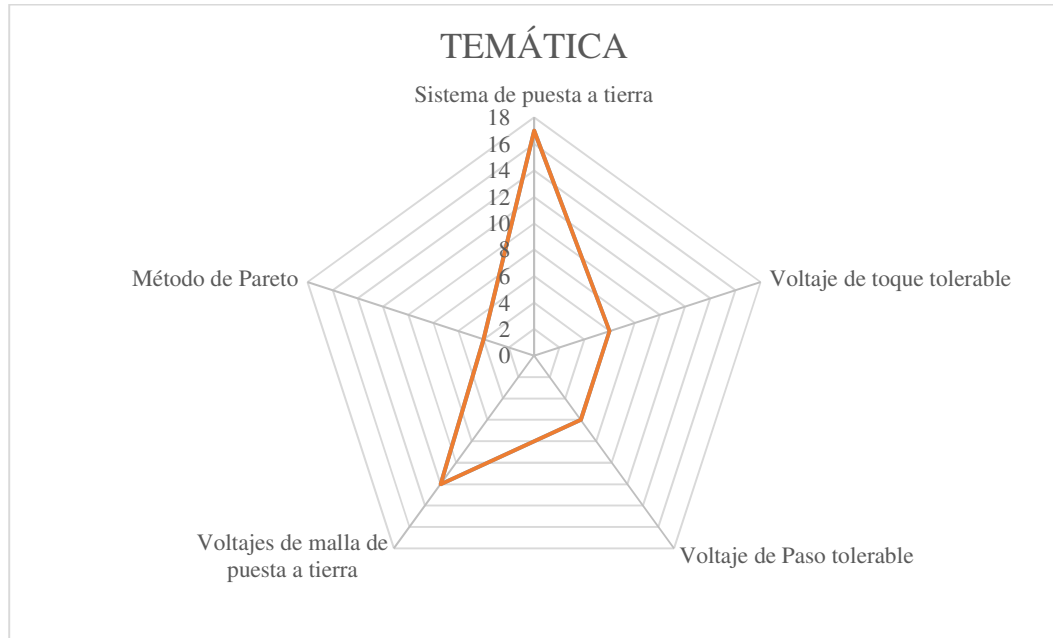


Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

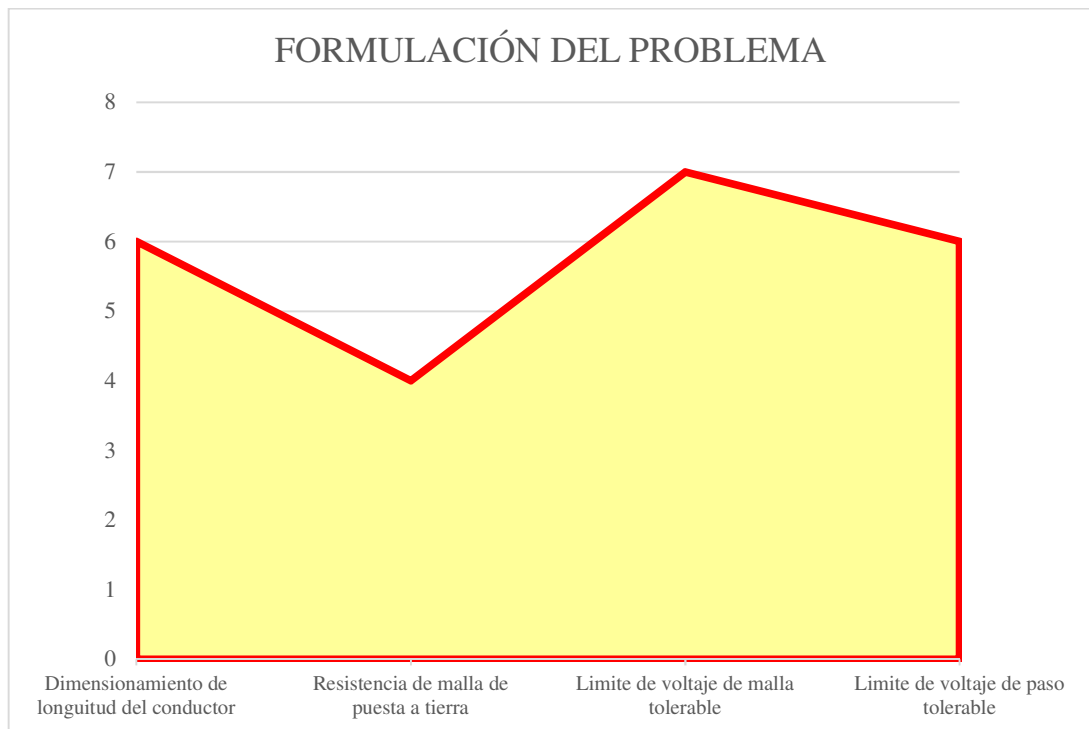


Figura 16. Indicador de la formulación del problema – Estado del Arte

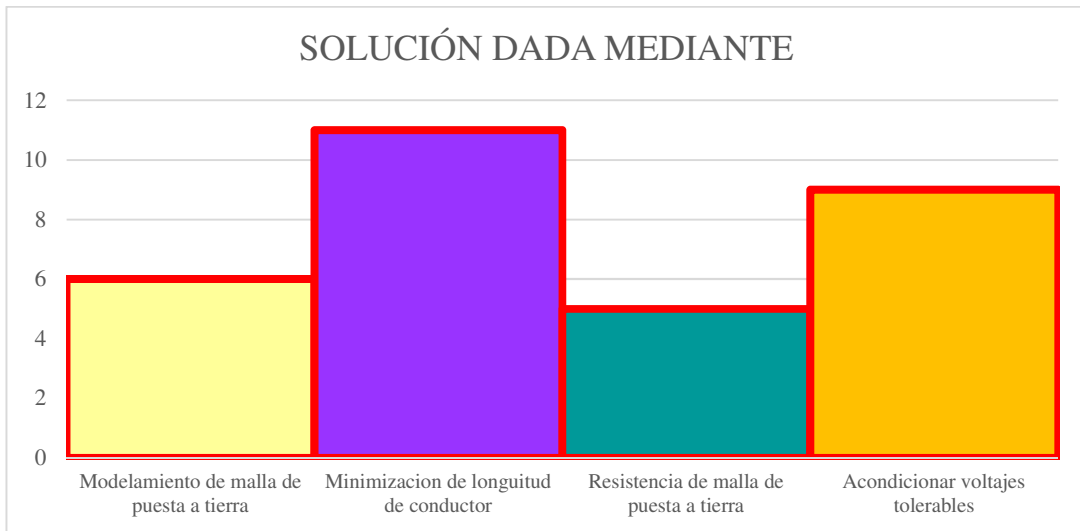


Figura 17. Indicador de solución – Estado del Arte