

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica



TESIS

Diseño e implementación del algoritmo “evolutive simulated annealing” para la optimización de redes de puesta a tierra

Para obtener el grado de Ingeniero Electricista

Elaborado por

José Enrique Farfán Lira

 [0000-0003-0543-9816](https://orcid.org/0000-0003-0543-9816)

Asesor

Mg. Alberto Sandoval Rodríguez

 [0000-0003-0947-0917](https://orcid.org/0000-0003-0947-0917)

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Farfán Lira [1]
Referencia/Reference	[1] J. Farfán Lira, "Diseño e <i>implementación del algoritmo "evolutive simulated annealing" para la optimización de redes de puesta a tierra</i> " [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Farfán, 2023)
Referencia/Reference	Farfán, J. (2023). <i>Diseño e implementación del algoritmo "evolutive simulated annealing" para la optimización de redes de puesta a tierra</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A Dios, por todo. A mi madre Consuelo y a mi hermano Omar que con su amor
y entrega me enseñaron a valorar las cosas y me conducen
día a día a dar lo mejor de mí.*

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial al asesor de mi tesis Msc. Ing. Alberto Sandoval Rodríguez, por su enseñanza, consejos y el apoyo brindado, los cuales me fueron muy útiles para poder comprender el efecto que tiene una puesta a tierra sobre una instalación eléctrica y proveer ejemplos para la validación del trabajo. Igualmente agradezco a la especialista Dr. Ing. Judith Betetta, quien ha contribuido con sus comentarios y observaciones a darle claridad a este trabajo.

Resumen

La puesta a tierra es un aspecto fundamental en la protección de las personas y equipos eléctricos en instalaciones de energía eléctrica, especialmente en subestaciones de alta tensión. La configuración adecuada de la red de puesta a tierra es esencial para disipar las corrientes de falla a tierra y minimizar el riesgo de choques eléctricos. En este sentido, la optimización de la red de puesta a tierra es un desafío importante que requiere el desarrollo de algoritmos eficientes y efectivos. En este contexto, el algoritmo "Evolutive Simulated Annealing" (ESA) se presenta como una solución innovadora para la optimización de redes de puesta a tierra. "ESA" es un algoritmo que incluye operaciones de mutación y entrecruzamiento en la búsqueda de soluciones vecinas dentro del algoritmo de recocido simulado, este último inspirado en el enfriamiento lento de materiales cristalinos. En esta tesis se implementa el algoritmo ESA para la optimización de redes de puesta a tierra y se cuantifica su efecto al aplicarse sobre tres casos de estudio. El enfoque se centra en la reducción del costo de los materiales empleados para su construcción, pero se analizan también los cambios en las tensiones de toque y paso, la resistencia de puesta a tierra y las variables que definen su configuración. Se espera que esta investigación contribuya al desarrollo de soluciones innovadoras y efectivas para la optimización de redes de puesta a tierra en instalaciones eléctricas, con la finalidad de mejorar la seguridad y eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

Palabras clave — Recocido simulado, algoritmos genéticos, red de puesta a tierra, optimización, Python

Abstract

Grounding is a fundamental aspect in the protection of people and electrical equipment in electrical power installations, especially in high voltage substations. Proper configuration of the grounding network is essential to dissipate or conduct fault currents to ground and minimize the risk of electrical shock. In this sense, the optimization of the grounding network is an important challenge that requires the development of efficient and effective algorithms. In this context, the "Evolutive Simulated Annealing" (ESA) algorithm is presented as an innovative solution for the optimization of grounding networks. ESA is an algorithm that includes mutation and crossover operations in the search for neighboring solutions within the simulated annealing algorithm, which is inspired by the slow cooling of crystalline materials. The objective of this thesis is the design and implementation of the ESA algorithm for the optimization of grounding networks. The focus is on reducing the cost of the materials used for their construction, but also analyzing changes in touch and step voltages, grounding resistance, and variables defining its configuration. It is expected that this research will contribute to the development of innovative and effective solutions for the optimization of grounding networks in electrical installations, with the aim of improving safety and efficiency in the use of electrical energy.

Keywords — Simulated annealing, genetic algorithm, grounding grid, metaheuristic optimization, python

Glosario de Términos

- bb:** Diámetro de las varillas verticales
- densgrava:** Densidad de la grava usada en la capa superficial
- des:** Número de descendientes producto del entrecruzamiento
- Em:** Tensión de malla
- Es:** Tensión de paso
- ESA:** Evolutive Simulaed Annealing o recocido simulado evolutivo
- Esmax:** Tensión de paso máximo
- Et:** Tensión de toque
- Etmax:** Tensión de toque máxima, también llamada tensión de malla
- h:** Profundidad de enterrado de la red horizontal
- hg:** Espesor de la capa de grava superior en metros
- Icond:** Mayor corriente eficaz de falla en la subestación en A
- IEEE 80:** Estandar "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding"
- Igrp:** Máxima corriente a ser disipada hacia el suelo en A
- L1:** Medida transversal inicial de la red de puesta a tierra en m
- L2:** Medida longitudinal inicial de la red de puesta a tierra en m
- Lv:** Longitud de las varillas verticales en m
- N:** Número de soluciones vecinas en el método SA y ESA
- n1:** Cantidad de conductores transversales
- n2:** Cantidad de conductores longitudinales
- NN:** Número de iteraciones en el metodo SA u ESA
- nr:** Factor que determina la cantidad de varillas verticales en la red de PAT
- PAT:** Puesta a tierra
- Rg:** Resistencia de puesta a tierra de la red
- ro:** Resistividad del terreno en Ω -m
- ros:** Resistividad de la grava en Ω -m
- SA:** Simulated Annealing o recocido simulado
- SfDf:** Multiplicación de los factores de división y decremento de corriente
- Ta:** Temperatura ambiente en °C
- ts:** Tiempo del shock eléctrico o tiempo de despeje de la falla
- x1 y x2:** Factor de crecimiento transversal y longitudinal de la red

Tabla de Contenido

	Pág
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Glosario de Términos.....	vii
Tabla de Contenido.....	viii
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Figuras	xi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Descripción del problema de investigación.....	2
1.2.1 Situación Problemática	2
1.2.2 Problema a resolver.....	3
1.3. Objetivos de estudio	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.3.3. Indicadores de logro de los objetivos.....	3
1.4. Antecedentes investigativos	4
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1. Marco Teórico.....	8
2.1.1 Redes de puesta a tierra.....	8
2.1.2. Cálculo de redes de puesta a tierra	10
2.1.3. Métodos metaheurísticos:.....	32

2.1.4. Herramientas informáticas	41
2.2. Marco Conceptual.....	43
Capítulo III. Análisis y discusión de resultados.....	45
3.1. Programa para el cálculo de la red de puesta a tierra	45
3.1.1 Función costo.....	49
3.1.2 Limitaciones o condiciones	51
3.1.3 Algoritmo Evolutive Simulated Annealing (ESA).....	52
Capitulo IV. Análisis de Resultados	55
4.1 Casos de estudio	55
4.1.1 Caso 1: Anexo B de la IEEE 80.	55
4.1.2 Caso 2: Tesis	56
4.1.3 Caso 3: Caso real	57
4.2 Validación del programa de cálculo y del algoritmo de optimización.....	58
4.2.1 Validación de la herramienta de cálculo	58
4.2.2 Validación del método de optimización.....	60
4.3 Optimización de los casos presentados	66
4.4 Influencia de la optimización sobre las tensiones de toque y paso.	67
4.5 Efecto de la optimización sobre la resistencia de puesta a tierra	69
4.6 Efecto de la optimización sobre la configuración de la red.....	71
4.6.1 Comportamiento de la variación del área de la red	72
4.6.2 Comportamiento de la profundidad de enterramiento de la red	73
4.6.3 Comportamiento de la longitud de conductor horizontal de la red.....	74
4.6.4 Comportamiento la longitud total de varillas verticales de la red.....	74

Conclusiones	78
Recomendaciones	79
Referencias bibliográficas.....	80
Anexos.....	84

Índice de Tablas

	Pág
Tabla 1: <i>Constantes de los materiales</i>	19
Tabla 2: <i>Calibres de conductores en AWG</i>	21
Tabla 3: <i>Costos unitarios considerados en el presente estudio</i>	51
Tabla 4: <i>Datos de entrada de la red para el ejemplo 3 de la IEEE 80</i>	55
Tabla 5: <i>Datos de entrada para caso de Tesis</i>	56
Tabla 6: <i>Datos de entrada para el caso real</i>	57
Tabla 7: <i>Comparación de parámetros de la red para el Caso 1</i>	58
Tabla 8: <i>Comparación de parámetros de la red para el Caso 2</i>	59
Tabla 9: <i>Comparación de parámetros de la red para el Caso 3</i>	59
Tabla 10: <i>Parámetros de la optimización</i>	60
Tabla 11: <i>Datos estadísticos de desempeño de los métodos de optimización</i>	63
Tabla 12: <i>Número de iteración donde alcanza el valor óptimo</i>	66
Tabla 13: <i>Comparación de costos</i>	66
Tabla 14: <i>Tensiones de toque y paso finales</i>	69
Tabla 15: <i>Valores de resistencia</i>	71
Tabla 16: <i>Valores finales del factor de variación del área de la red</i>	72
Tabla 17: <i>Valores finales de longitud de la red horizontal</i>	74
Tabla 18: <i>Valores finales de longitud total de varillas verticales</i>	75
Tabla 19: <i>Comparación de parámetros de configuración de la red del Caso 1</i>	76
Tabla 20: <i>Comparación de parámetros de configuración de la red del Caso 2</i>	76
Tabla 21: <i>Comparación de parámetros de configuración de la red del Caso 3</i>	77

Índice de Figuras

	Pág
Figura 1: <i>Telurómetro aplicando el método Wenner</i>	12
Figura 2: <i>Resistividad aparente vs separación de electrodos, tendencia decreciente</i>	13
Figura 3: <i>Resistividad aparente vs separación de electrodos, tendencia creciente</i>	14
Figura 4: <i>Resistividad aparente vs separación de electrodos, tendencia uniforme</i>	14
Figura 5: <i>Modelo biestrato</i>	15
Figura 6: <i>Ejecución de método Wenner en diferentes direcciones</i>	16
Figura 7: <i>Gráfica de mediciones en distintos ejes y valor medio</i>	16
Figura 8: <i>Esquema de varilla vertical en suelo biestrato</i>	17
Figura 9: <i>Diferentes tipos de conectores para uniones</i>	19
Figura 10: <i>Tipos de conexión por soldadura</i>	20
Figura 11: <i>Esquema de tensión de paso</i>	22
Figura 12: <i>Potencial de tierra durante la falla</i>	23
Figura 13: <i>Esquema de tensión de toque</i>	23
Figura 14: <i>Tensión de toque y tensión de paso en la subestación de AT</i>	24
Figura 15: <i>Definición de la configuración de la red de puesta a tierra</i>	25
Figura 16: <i>Gráfica de coeficiente k_1</i>	28
Figura 17: <i>Gráfica de coeficiente k_2</i>	28
Figura 18: <i>Diagrama de flujo de recocido simulado</i>	34
Figura 19: <i>Funcionamiento del método recocido simulado</i>	36
Figura 20: <i>Diferencia entre genotipo y fenotipo</i>	37
Figura 21: <i>Recombinación genética y mutación</i>	38
Figura 22: <i>Diagrama funcional de algoritmo genético</i>	39
Figura 23: <i>Diagrama de flujo de algoritmo genético básico</i>	40
Figura 24: <i>Flujo de datos en el cálculo de redes de puesta a tierra</i>	45
Figura 25: <i>Diagrama de flujo para cálculo de red de puesta a tierra</i>	48
Figura 26: <i>Diagrama de método ESA</i>	54
Figura 27: <i>Datos ordenados de optimizaciones realizadas con ESA y SA caso 1</i>	61

Figura 28: <i>Datos ordenados de optimizaciones realizadas con ESA y SA caso 2</i>	62
Figura 29: <i>Datos ordenados de optimizaciones realizadas con ESA y SA caso 3</i>	62
Figura 30: <i>Proceso de optimización para el caso 1</i>	64
Figura 31: <i>Proceso de optimización para el caso 2</i>	65
Figura 32: <i>Proceso de optimización para el caso 3</i>	65
Figura 33: <i>Valores de tensiones de toque y paso para el caso 1</i>	67
Figura 34: <i>Valores de tensiones de toque y paso para el caso 2</i>	68
Figura 35: <i>Valores de tensiones de toque y paso para el caso 3</i>	68
Figura 36: <i>Comportamiento de la resistencia de PAT en la optimización para el caso 1</i>	69
Figura 37: <i>Comportamiento de la resistencia de PAT en la optimización para el caso 2</i>	70
Figura 38: <i>Comportamiento de la resistencia de PAT en la optimización para el caso 3</i>	70
Figura 39: <i>Comportamiento de la variación del área de la red</i>	72
Figura 40: <i>Comportamiento de la profundidad de enterramiento de la red</i>	73
Figura 41: <i>Comportamiento del espesor de la capa de grava</i>	73
Figura 42: <i>Comportamiento de la longitud de conductor horizontal de la red</i>	74
Figura 43: <i>Comportamiento la longitud total de varillas verticales de la red</i>	75

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1. Generalidades

La puesta a tierra es un aspecto crucial en la protección de personas y equipos eléctricos en instalaciones de energía eléctrica, especialmente en subestaciones de alta tensión. Lograr una configuración adecuada de la red de puesta a tierra es fundamental para disipar las corrientes de falla a tierra y minimizar el riesgo de choques eléctricos. En este contexto, surge un desafío significativo: la optimización de la red de puesta a tierra, que demanda el desarrollo de algoritmos eficientes y efectivos.

En busca de soluciones innovadoras, se presenta el algoritmo "Evolutive Simulated Annealing" (ESA) como una herramienta poderosa para la optimización de redes de puesta a tierra. "ESA" incorpora operaciones de mutación y entrecruzamiento, utilizando el concepto de recocido simulado, inspirado en el enfriamiento lento de materiales cristalinos. Este enfoque permite buscar soluciones vecinas, mejorando progresivamente la configuración de la red de puesta a tierra.

En el presente trabajo de tesis, se implementa el algoritmo ESA para optimizar redes de puesta a tierra y se evalúa su rendimiento en tres casos de estudio. El objetivo principal es reducir el costo de los materiales empleados en su construcción, sin descuidar otros aspectos fundamentales como las tensiones de toque y paso, la resistencia de puesta a tierra y las variables que definen su configuración.

Se prioriza el desarrollo de soluciones eficientes para mejorar la seguridad y eficiencia en el uso de la energía eléctrica en instalaciones eléctricas. Se reconoce que el enfoque económico es importante, pero sin comprometer la integridad y bienestar de las personas y el personal involucrado en el funcionamiento de las subestaciones.

En resumen, esta investigación busca contribuir al avance de soluciones innovadoras y efectivas en la optimización de redes de puesta a tierra en instalaciones

eléctricas. Se espera que los resultados obtenidos a través del algoritmo ESA impulsen el desarrollo de prácticas más seguras y eficientes, garantizando así la protección adecuada de las personas y equipos eléctricos en el entorno de subestaciones de alta tensión.

1.2. Descripción del problema de investigación

1.2.1 Situación Problemática

Las redes de puesta a tierra desempeñan un papel crítico en la seguridad del personal operativo que labora dentro de una subestación de alta tensión, así como en la funcionalidad y operatividad de la misma. Un diseño adecuado de la puesta a tierra es fundamental para garantizar que las fallas del sistema y las descargas atmosféricas puedan disiparse adecuadamente, conservando potenciales seguros en el interior de la subestación y áreas circundantes.

El propósito del diseño óptimo de una red de puesta a tierra es minimizar el costo de su construcción, tanto en material como en mano de obra, a la vez que se cumplen los requerimientos de seguridad establecidos en los límites de tensiones de paso, tensiones de toque y la resistencia de puesta a tierra detallados en el estándar 80 de la IEEE ("IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," 2015).

Para lograr este objetivo, se emplean métodos metaheurísticos que permiten resolver problemas complejos, como la optimización de procedimientos de ingeniería. Uno de estos métodos es el recocido simulado o "simulated annealing", inspirado en el proceso de recristalización de materiales metales y cerámicos cuando son sometidos a un calentamiento y un descenso lento de temperatura (Černý, 1985). Sin embargo, se ha observado que estos métodos pueden requerir un alto esfuerzo computacional para salir de mínimos y máximos locales. Por tanto, se propone incluir estrategias propias de métodos evolutivos, como mutaciones y entrecruzamiento, para continuar con la búsqueda global del valor óptimo (Tran et al., 2021).

1.2.2 Problema a resolver

La presente investigación presenta el diseño e implementación de una herramienta de cálculo basada en el método metaheurístico llamado recocido simulado evolutivo o "evolutive simulated annealing" para diseñar redes de puesta a tierra de mínimo costo, cumpliendo con el estándar 80 de la IEEE.

1.3. Objetivos de estudio

El objetivo general y los objetivos específicos se detallan a continuación:

1.3.1. Objetivo General

Determinar como el diseño e implementación en Python del algoritmo "Evolutive Simulated Annealing" influye en la optimización de redes de puesta a tierra

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Validar el código hecho en Python para la aplicación del método metaheurístico "Evolutive Simulated Annealing" sobre la optimización del presupuesto de redes de puesta a tierra.
- b) Analizar cómo influye el diseño e implementación del algoritmo "Evolutive Simulated Annealing" en el incremento de tensiones durante fallas en las redes de puesta a tierra.
- c) Establecer el efecto de la implementación del algoritmo "Evolutive Simulated Annealing" en la resistencia de la red de PAT.
- d) Mostrar como la configuración de una red de puesta a tierra es afectada por la implementación del algoritmo "Evolutive Simulated Annealing".

1.3.3. Indicadores de logro de los objetivos

- a) El código hecho en Python se considera validado al calcular los parámetros eléctricos de redes de puesta a tierra pertenecientes al estado del arte y comparar los resultados obtenidos con sus referencias obteniendo

diferencias menores al 10%. El algoritmo de optimización se valida mediante comparación con otro algoritmo también del estado del arte.

- b) En el proceso de aplicación del algoritmo “Evolutive Simulated Annealing” a la optimización de redes de puesta a tierra, el valor de las tensiones de toque y paso calculadas deben ser menores a las restricciones indicadas en la norma IEEE 80.
- c) El algoritmo “Evolutive Simulated Annealing” aplicado a las redes de puesta a tierra debe restringir el valor de la resistencia de puesta a tierra a valores menores a 1Ω para permitir la disipación de corrientes de falla.
- d) El algoritmo “Evolutive Simulated Annealing” afecta a la configuración de la red de puesta a tierra modificándola de tal forma que el material utilizado en su implementación sea menor a los calculados en la referencia.

1.4. Antecedentes investigativos

Lozano C. (2020) Optimización del Diseño de Puestas a Tierra, Utilizando Elementos Finitos en la SET Constitución – Universidad Nacional del Centro del Perú

El objetivo de la investigación fue mejorar el diseño del sistema de puesta a tierra en la subestación eléctrica de transmisión Constitución mediante el uso de elementos finitos. El estudio de la red de puesta a tierra requería analizar varios sistemas, lo cual requería mucho tiempo y esfuerzo, por lo que se utilizó el software ETAP para facilitar el proceso. La tesis se enfocó en la influencia de los valores de puesta a tierra con elementos finitos en la subestación Constitución, y se realizó un modelado y simulación de la red de puesta a tierra para verificar los valores medidos, garantizar la seguridad de las personas y el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos. El resultado de la simulación fue consistente, con la norma IEEE 80; se obtuvo una resistencia de puesta a tierra de 0.192417Ω y con el método de elementos finitos de 0.19Ω (Lozano Campos, 2020, p. xi)

Kaushal Pratap Sengar (2020). Effects of cost optimised grid configuration on earthing system performance: a comparative assessment - IET Science, Measurement & Technology

Este estudio presenta una comparación de distintas configuraciones de redes de puesta a tierra para determinar el diseño óptimo en términos de seguridad y costo para una subestación de 66/11 kV. Se consideró un área fija de puesta a tierra de 9000 m² y se evaluaron rejillas rectangulares, triangulares, en forma de L y en forma de T enterradas en un modelo de suelo de dos capas. Se utilizaron tres métodos diferentes, el estándar ANSI/IEEE 80-2000, el método de elementos finitos y los algoritmos genéticos, para diseñar las rejillas. Se siguieron todas las restricciones de seguridad del estándar IEEE para diseñar la red de puesta a tierra. Se propuso una nueva función matemática de coste (CF) para diseñar sistemas de puesta a tierra triangulares, en forma de L y en forma de T efectivos y económicos, que incluyeron variables como la profundidad de la rejilla, las dimensiones de la varilla de puesta a tierra y el conductor horizontal, el número de varillas y conductores, el revestimiento y el área de excavación. La rejilla de puesta a tierra económica obtenida a través del método propuesto redujo el costo total relacionado con los materiales, la instalación y la excavación de la rejilla. El análisis mostró que la malla rectangular fue la más segura, mientras que la malla triangular fue la más económica. En general, la rejilla de puesta a tierra rectangular mostró mejores resultados en comparación con las configuraciones triangular, en forma de T y en forma de L. (Sengar & Chandrasekaran, 2020, p. 1)

El-Refaie. E (2018) Optimal Arrangement for the Grounding Grid Conductors by Using PSO - 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)

Este texto habla sobre la importancia del diseño adecuado de la red de puesta a tierra para garantizar la seguridad del personal y el rendimiento del sistema de energía. Se menciona que se han realizado muchos estudios previos para minimizar el costo de la red y optimizar sus características. En este artículo, se utiliza la técnica de optimización del enjambre de partículas en combinación con la matriz de integración para encontrar los parámetros óptimos de las redes de puesta a tierra. El objetivo es encontrar la mejor distribución de conductores dentro de la red para diferentes áreas y números de conductores. Los resultados muestran que, para un número dado de conductores, la distribución de los mismos es la misma independientemente del tamaño de la malla, en caso de optimizar el aumento del potencial de tierra. Sin embargo, los resultados pueden variar al optimizar la tensión de paso y contacto. (El-Refaie et al., 2018, p. 1)

Chunfeng Song (2018), The Optimization Algorithm for the Auxiliary Anode System of Grounding Grid Based on Simulated Annealing - 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)

Este artículo de conferencia trata sobre la importancia de la red de puesta a tierra en la seguridad de la subestación y presenta un algoritmo de optimización para el sistema de ánodo auxiliar de la rejilla de puesta a tierra. El diseño de los parámetros en el sistema de ánodo auxiliar de la rejilla de puesta a tierra puede ser difícil y el algoritmo propuesto se basa en el recocido simulado mejorado para optimizar los parámetros del modelo de elementos finitos. El modelo matemático del sistema de ánodos auxiliares se deriva del modelo matemático de la protección catódica. Se optimizan los parámetros del modelo de elementos finitos y se estructura el sistema de ánodo auxiliar de la rejilla de puesta a tierra con los parámetros optimizados. Los resultados de los proyectos prueban la validez del algoritmo, con una mejora del 1,55 % en la precisión de los

parámetros optimizados en comparación con el Método Métrico Variable y el Algoritmo Genético. (Song et al., 2018, p. 1)

Alik B. (2015) Minimization of Grounding System Cost Using PSO, GAO, and HPSGAO Techniques - IEEE Transactions on Power Delivery

En este artículo de revista científica se han ideado tres técnicas de optimización metaheurísticas con el fin de proponer un sistema de puesta a tierra seguro y asequible para la futura central eléctrica de Labreg, ubicada en la ciudad de Khenchela, Argelia. Los algoritmos han sido creados mediante el uso de optimización de enjambre de partículas (PSO), optimización de algoritmo genético (GAO) y optimización de algoritmo genético de enjambre de partículas híbridas (HPSGAO). El objetivo principal es minimizar los costos del sistema de puesta a tierra en función de la decisión óptima de construcción y parámetros geométricos, en cumplimiento con las normas de seguridad de la norma ANSI/IEEE 80-2000. Además, se ha presentado un nuevo modelo matemático para la función de costo, que incluye variables como el número de conductores, la dimensión del conductor, la profundidad de la rejilla, el número y longitud de las varillas, el área total de excavación y el revestimiento. Los resultados indican que la técnica HPSGAO ofrece los costos más bajos en comparación con los métodos GAO y PSO. La adecuación entre los parámetros de seguridad de la técnica HPSGAO confirma la eficacia de los algoritmos sugeridos. (Alik et al., 2015, p. 1)

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1. Marco Teórico

2.1.1 Redes de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra son estructuras subterráneas que en general cumplen las siguientes funciones:

- Incrementar la sensibilidad de los equipos de protección a tierra, como los relés o interruptores diferenciales.
- Conectar a las superficies conductoras o envolventes, de equipamiento eléctrico y no eléctrico, directamente a tierra para prevenir potenciales que generen choques eléctricos.
- Brindar un camino de retorno de baja impedancia para las corrientes de falla por contacto accidental y descargas atmosféricas
- Estabilizar el voltaje durante condiciones de operaciones normales

Todas estas funciones se encuentran relacionadas con la protección de las personas y son válidas tanto para instalaciones eléctricas domiciliarias, industriales, de distribución, de transmisión etc. Un buen sistema de puesta a tierra permite reducir la intensidad de un choque eléctrico, en situaciones convencionales a niveles imperceptibles y en instalaciones de transmisión a niveles no letales.

En el caso específico de las subestaciones de transmisión, se debe tomar en cuenta que en ella existen muchos equipos de alta y media tensión, tal que existe la posibilidad de que ocurran fallas a tierra en casi toda la subestación, entonces la puesta a tierra debe de abarcar toda el área de la subestación, para que estas fallas puedan ser disipadas o conducidas a tierra oportunamente minimizando el riesgo de afectación del personal de la subestación, incrementando a su vez la sección de contacto permitiendo una mejor disipación de las fallas, es ahí donde la configuración de una red de puesta a tierra toma sentido.

El alto amperaje característico de una falla a tierra en alta o media tensión debe de disiparse a través de la red de puesta a tierra hacia el suelo, es por ese motivo que se requiere un buen contacto entre el terreno y el cobre y así la extensión (área) de la red toma un rol fundamental en los parámetros eléctricos de la misma. La conducción de la alta corriente de falla a tierra ocasiona una elevación del potencial eléctrico de todo el sistema de tierra, incluye carcazas de equipos y demás superficies metálicas, este potencial es proporcional a la resistencia de la red de puesta a tierra, por ello se requiere minimizar la resistencia de puesta a tierra a valores inferiores a 1Ω , la limitación del potencial el sistema de tierra durante una falla influye en tensiones de toque y de paso menos perjudiciales.

Para realizar el diseño de la red de puesta a tierra es necesario conocer las características del entorno y del proyecto, estas condicionan el diseño y no se tiene mayor control sobre ellas por lo que se consideran constantes. Estos factores externos se nombran a continuación:

- El área mínima de la red en la subestación a construir, determinada por el diseño de la subestación, determinada por su extensión transversal y longitudinal.
- El área final posible de la red en la subestación.
- La resistividad del suelo en donde se realizará la malla de puesta a tierra, pudiendo esta tierra tratarse para reducir su resistividad.
- La máxima corriente de falla a tierra calculada para las diferentes tensiones presentes en la subestación.
- El tiempo de acción de los dispositivos de protección.
- Resistividad de la grava usada en la capa superficial.
- Existencia o no de recloser en la línea.
- Tipo de metal conductor y sus características.

La configuración de la red de puesta a tierra consiste en un conjunto de diferentes características variables en cantidad o dimensión que definen la morfología de la red de puesta a tierra, estas son:

- La extensión longitudinal y transversal de la red, dentro de los límites establecidos.
- Los conductores que conforman la red horizontal, tanto transversal como longitudinalmente.
- Número y longitud de electrodos verticales unidos los conductores de la red horizontal.
- La profundidad de enterramiento de la red horizontal.
- El espesor de la capa de grava superficial.

La configuración física definida por las variables indicadas anteriormente condiciona el comportamiento de la red de puesta a tierra ante fallas. Para que esta red sea considerada válida, es decir segura, debe de cumplir con dos criterios limitantes:

- Tensiones máximas de toque y paso que puede soportar una persona, definidas en la norma IEEE 80.
- La resistencia máxima de 1Ω de la red de puesta tierra, valor no presente en normas nacionales pero usada como referencia en diversos libros técnicos del tema (Casas Ospina, 2008).

2.1.2. Cálculo de redes de puesta a tierra

Para definir las propiedades y límites de una red de puesta a tierra es necesario conocer algunos conceptos desarrollados a continuación:

2.1.2.1. La extensión de la red de puesta a tierra

El área es un dato que puede obtenerse fácilmente de los planos de ubicación de la subestación y de la disposición de los equipos de media y alta tensión necesarios para el funcionamiento de la misma. Si bien el estándar IEEE 80 contempla otras

geometrías, específicamente la forma en “L”, en este trabajo solo se exploran las redes de forma rectangular tal que el área corresponda a la Ecuación (1).

$$\text{Área} = L_1 \cdot L_2 \dots (1)$$

Donde:

Área: Área de la red de puesta a tierra en m^2

L_1 : Extensión longitudinal de la red en m

L_2 : Extensión transversal de la red en m

La extensión de la red es un parámetro fundamental para el cálculo de la resistencia de la red, así como las tensiones de toque y paso, por ello deben de diferenciarse dos casos.

- La subestación, así como la red de puesta a tierra tienen una extensión fija, esto se da cuando hay limitaciones en el terreno de la subestación por tener otras instalaciones circundantes, normalmente en entornos urbanos.
- La subestación, así como la red de puesta a tierra tienen posibilidad de incrementar su extensión en un rango definido, permitiendo incrementar su superficie de contacto y por ello reducir su resistencia, esto es posible normalmente en entornos rurales.

2.1.2.2. La resistividad del terreno

La resistividad del terreno es una característica del suelo como material conductor, esta resistividad depende de los materiales que componen el suelo, pudiendo ser una combinación de arena, grava, limo, roca madre, tierra cultivable etc. Estos materiales se encuentran distribuidos en forma estratificada variando la concentración de sus componentes y su resistividad con la profundidad.

El comportamiento de la resistividad con respecto a la profundidad suele ser uniforme, permanentemente descendente, permanentemente ascendente y en muy

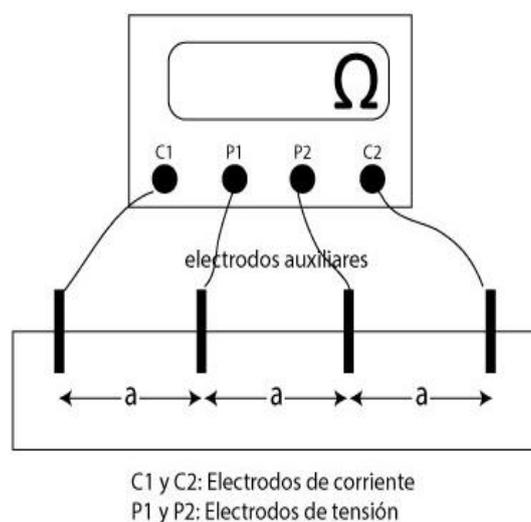
pocos casos tener partes donde el valor de la resistividad sube y luego baja o viceversa. Es necesario caracterizar la resistividad del suelo a diferentes profundidades para definir la forma correcta del aterramiento a utilizar.

La forma más común, y por ello la más práctica, de caracterizar la resistividad del suelo es mediante el método Wenner (ASTM G57-20 - 2020), este se vale de un equipo de medición llamado telurómetro que permite inyectar un flujo de corriente en el suelo a través de dos electrodos auxiliares, llamados electrodos de corriente, y leer la tensión entre otros dos electrodos auxiliares, llamados electrodos de tensión, por su disposición a estos electrodos se les suele llamar también electrodos exteriores e interiores respectivamente, dichos electrodos auxiliares se encuentran igualmente espaciados una longitud "a" formando una línea recta, como se muestra en la **Figura 1** El telurómetro muestra en su pantalla un valor llamado resistencia aparente, el cual es la división de la tensión y corriente registrados en sus electrodos auxiliares.

Los electrodos deben de hacer un buen contacto con el suelo, especialmente los electrodos de corriente. El contacto puede mejorarse usando algún liquido con electrolitos como sal diluida en agua.

Figura 1

Telurómetro aplicando el método Wenner



Nota: Elaboración propia

El valor de resistencia aparente luego es convertido en un valor de resistividad mediante la Ecuación (2).

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \dots (2)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente, que representa la resistividad de un estrato inferior en $\Omega - m$

a : Distancia entre los electrodos auxiliares en m

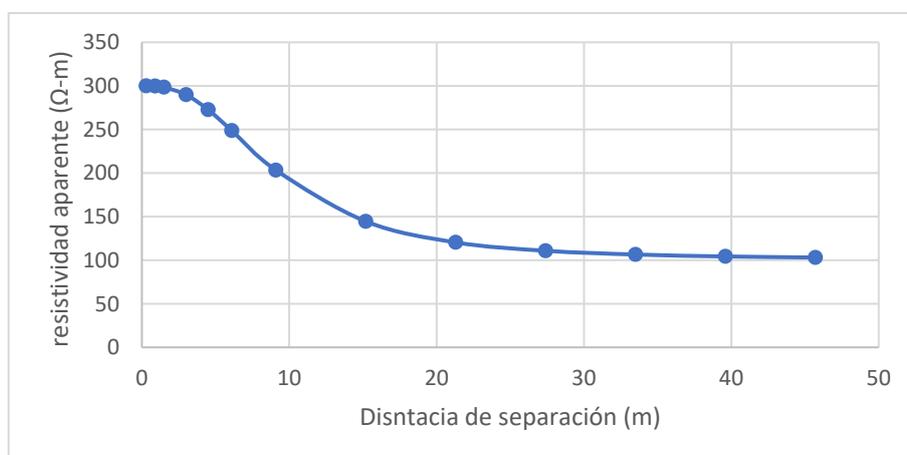
R : Resistencia aparente obtenida en la pantalla del telurómetro en Ω

Esta ecuación requiere que la profundidad de enterramiento de los electrodos auxiliares sea despreciable con respecto a la distancia "a".

Realizando el método Wenner para distintos valores de "a" se forma la gráfica mostrada en la Figura 2, mostrando en este caso un comportamiento decreciente, tal que a mayor profundidad se tiene una menor resistividad y conviene el uso de electrodos verticales y excavaciones más profundas.

Figura 2

Resistividad aparente vs separación de electrodos, tendencia decreciente.

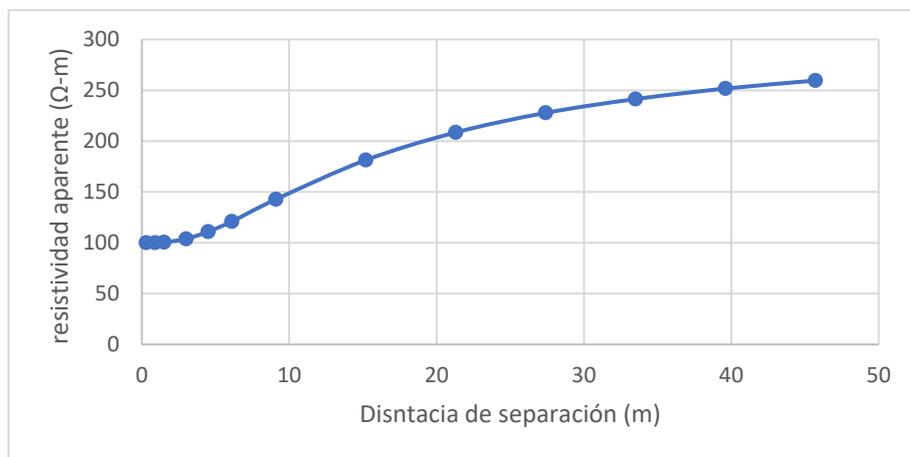


Nota: fuente: Adaptado de (IEEE 81 -2012)

La Figura 3 es análoga a la Figura 2 pero en un suelo cuya resistividad aumenta con respecto a la profundidad. En este caso buscar un estrato más profundo con varillas verticales no surte un efecto aceptable, la mejor decisión es variar la extensión de la puesta usando electrodos adicionales llamados “apoyos”, a tierra mejorando así su contacto con el primer estrato.

Figura 3

Resistividad aparente vs separación de electrodos, tendencia creciente.

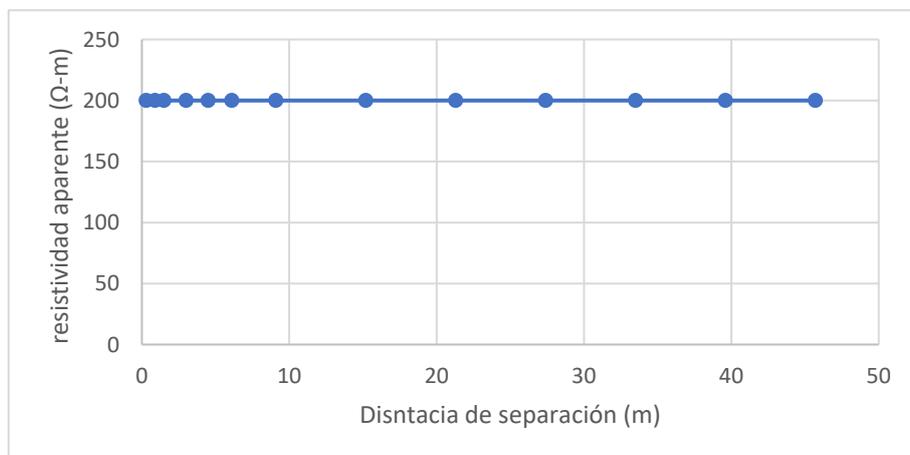


Nota: fuente: Adaptado de (IEEE 81 -2012)

La Figura 4 muestra un comportamiento uniforme en el rango de medición, es posible que la tendencia varíe o se defina a mayor profundidad.

Figura 4

Resistividad aparente vs separación de electrodos, tendencia uniforme

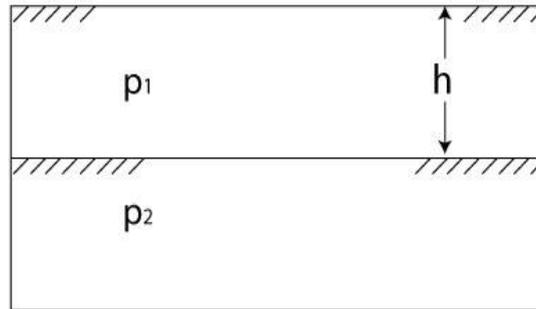


Nota: fuente: Elaboración propia

Los tres tipos de estratos graficados pueden simplificarse a un modelo biestrato como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Modelo biestrato



Nota: fuente: Adaptado de "Figura A.1—Two-layer earth" Ref. (IEEE 81 - 2012)

Donde:

ρ_1 : Resistividad de la capa superior en $\Omega - m$

ρ_2 : Resistividad de la capa inferior en $\Omega - m$

h : Profundidad de la capa superior

En el caso específico de la Figura 2, los datos obtenidos corresponden a un modelo biestrato de $\rho_1 = 300$, $\rho_2 = 100$ y $h = 6.1$. La Figura 3 muestra una gráfica correspondiente a los valores $\rho_1 = 100$, $\rho_2 = 300$ y $h = 6.1$. Finalmente, la Figura 4 corresponde a una función constante con $\rho_1 = 200$ y un h indefinido.

La relación entre el modelo biestrato y la gráfica obtenida con el método Wenner se detalla en la Ecuación (3)

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1+(2nh/a)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2nh/a)^2}} \right) \right] \dots \quad (3)$$

Donde:

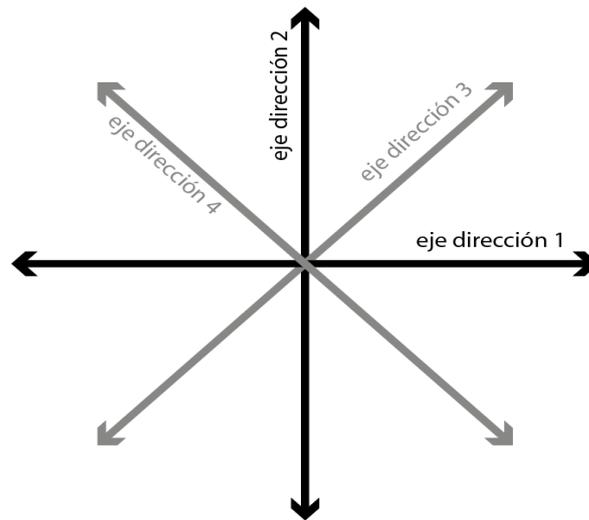
K : Constante de reflexión definida como $(\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$

a : Separación entre electrodos auxiliares

Debido a que existen variaciones de resistividad entre distintos puntos del mismo estrato, es necesario realizar el procedimiento de Wenner en diferentes ejes o direcciones como se muestra e la Figura 6.

Figura 6

Ejecución de método Wenner en diferentes direcciones

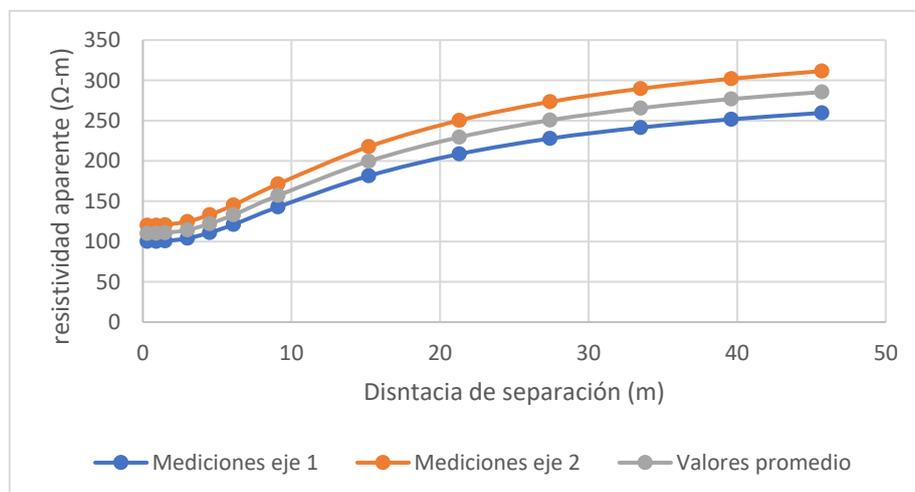


Nota: Elaboración propia

Para caracterizar correctamente un suelo a partir de mediciones en diferentes ejes se debe de considerar el valor medio de cada grupo de mediciones que coincidan en distancia de electrodos "a", esto se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Gráfica de mediciones en distintos ejes y valor medio.



Nota: Elaboración propia

En este trabajo se considera que las diferencias entre los valores de resistividad de ambos estratos no son significativas, ya que los siguientes pasos del cálculo de la red de puesta a tierra requieren un único valor de resistividad de terreno.

Para realizar el cálculo de los parámetros de la resistencia de puesta a tierra es necesario considerar valores representativos de la resistividad del suelo, en caso de la resistencia de los conductores horizontales, deberá considerarse la resistividad del estrato en el que se encuentren; en caso el estrato inferior tenga una ρ_2 menor al ρ_1 (curva decreciente) y se considere el uso de electrodos verticales para aprovechar el efecto positivo de este estrato inferior es necesario usar la siguiente Ecuación para la resistividad equivalente de ambos estratos.

$$\rho_{eq} = \frac{Lr \cdot \rho_2 \cdot \rho_1}{\rho_2(h_1 - h) + \rho_1(Lr + h - h_1)} \dots (4)$$

Donde:

Lr : Longitud de la varilla vertical en m

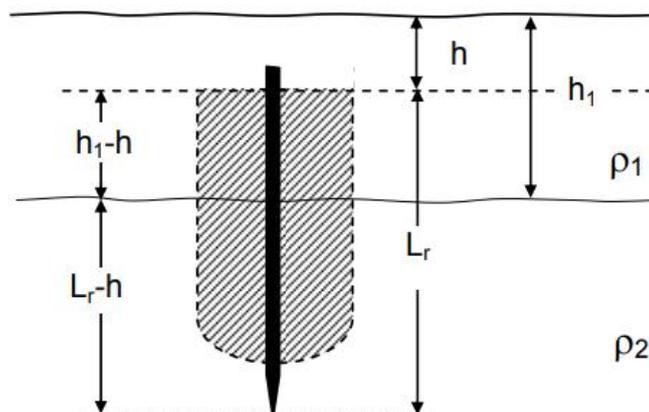
h_1 : Profundidad del primer estrato en m

h : Profundidad de la parte superior de la varilla en m

Los parámetros de la Ecuación (4) se muestran en la Figura 8.

Figura 8

Esquema de varilla vertical en suelo biestrato



Nota: fuente Adaptado de (M. Yanque, 2006)

2.1.2.3. Calibre del conductor

El calibre del conductor depende de varios factores los cuales conforman la Ecuación (5).

$$I = A_c \sqrt{\left[\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right] \ln \left[\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right]} \dots (5)$$

Donde:

I : Corriente eficaz en KA

A_c : Área del conductor en mm^2

T_m : Temperatura máxima permitida $^{\circ}C$

T_a : Temperatura ambiente en $^{\circ}C$

T_r : Temperatura de referencia en $^{\circ}C$

α_r : Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura T_r a $1/^{\circ}C$

K_0 : $1/\alpha_r$ $^{\circ}C$

ρ_r : Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r
en $\mu\Omega cm$

t_f : Tiempo de despeje de la corriente de falla en s

$TCAP$: Factor de capacidad térmica $J/(cm^3 \text{ } ^{\circ}C)$

Cabe destacar que la misma norma incluye la Tabla 1 donde figuran los valores de las constantes para los diferentes metales contemplados.

En la Tabla 1. se muestra un valor de temperatura máxima del material (Temp. máxima [$^{\circ}C$]), este depende del tipo de unión realizada en los cruces entre conductores, pudiendo ser empernadas, realizadas por compresión (encrimpado) o por soldadura. Solo en el caso de la soldadura exotérmica se garantiza la completa continuidad del

material en las uniones de la red, por lo que en este caso se considera como temperatura máxima la temperatura de fusión del metal, esta temperatura es la que figura en la Tabla 1 por ser la forma de unión más utilizada.

Tabla 1

Constantes de los materiales

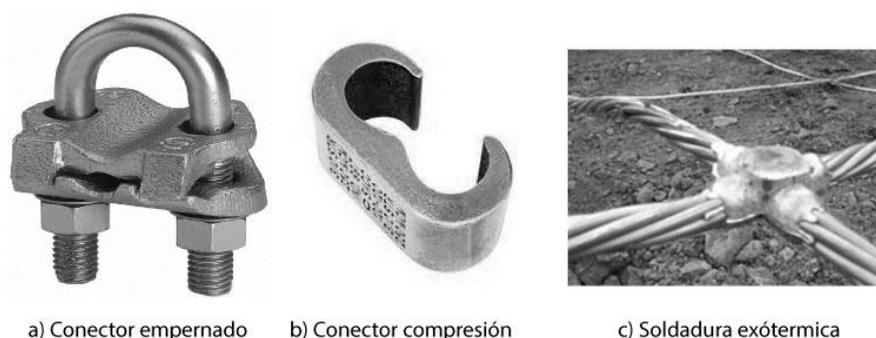
Material	Conduct. [%]	α_r a 20°C [1/°C]	K_0 : a 0°C [°C]	Temp. máxima [°C]	ρ_r a 20°C [$\mu\Omega cm$]	Factor TCAP [J/($cm^3 \text{ } ^\circ C$)]
Cobre recocido	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre estirado en frío	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Acero cobrizado	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Acero cobrizado	30.0	0.00378	245	1095	5.86	3.85
Aluminio comercial IEC	61.0	0.00403	228	667	2.86	2.56
Aleación de aluminio 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aleación de aluminio 5201	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Acero aluminizado	20.3	0.00380	258	657	8.48	3.58
Acero galvanizado	8.6	0.00320	293	419	20.1	3.93
Acero inoxidable	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.03

Nota: fuente Adaptado de "Table 1—Material constants" ("IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," 2015)

Los 3 tipos de uniones muestran en la Figura 9.

Figura 9

Diferentes tipos de conectores para uniones



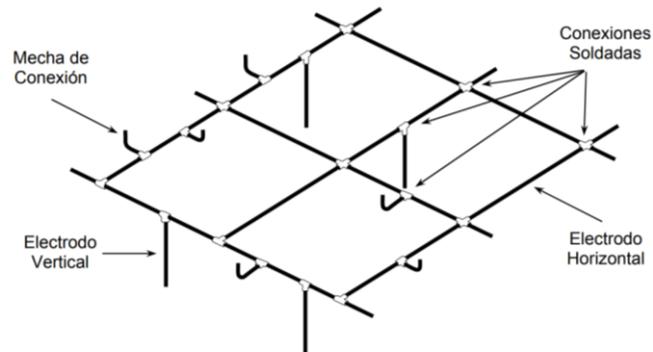
Nota: fuente Adaptado de "Figura 12. 6 - Diferentes tipos de conexión" (Ramirez Mejia, 1991)

Las uniones realizadas por soldadura se realizan mediante una reacción química llamada termítica, la cual es explosiva y altamente exotérmica, tiene al aluminio y el óxido de cobre como reactivos, requiere una alta temperatura para iniciar la reacción, normalmente se usa un molde que pueda soportarla y una mecha de magnesio o similar. Estas uniones son necesarias tanto para los cruces de conductores dentro de la red,

donde se usan uniones en forma de cruz, como para la periferia de la red y la conexión de las varillas verticales, donde se usan las uniones tipo “T” como muestra la Figura 10.

Figura 10

Tipos de conexión por soldadura



Nota: fuente Tomado de “Figura 1. Detalle constructivo de una Red de Puesta a Tierra” (M. Yanque, 2006)

Si bien la norma IEEE 80 contempla el uso de diferentes metales para la manufactura de las redes de puesta a tierra, el material más usado es el cobre recocido, esto pues es un material químicamente muy estable por lo que resiste la corrosión incluso al estar enterrado. Otros materiales requieren métodos anticorrosivos adicionales como ánodos de sacrificio o sistemas de corriente impresa.

Sobre el tiempo de despeje de la falla o t_f , es necesario tomar en cuenta la existencia de los “reclosers” o interruptores de recierre, en caso de incluirlos en el diseño de las líneas eléctricas se debe considerar el tiempo total de todos los recierres, normalmente 3, con se muestra en la Ecuación (6).

$$t_f = 3 \cdot t_s \dots (6)$$

Donde:

t_f : Tiempo total de los recierres en s

t_s : Tiempo de cada recierre individual en s

En caso no exista un recloser contemplado en el diseño de las líneas ligadas a la subestación, suele considerarse que t_f y t_s son iguales.

En cuanto a la corriente eficaz I en este punto se considera a la corriente de la peor falla a tierra posible en la subestación a pesar que la corriente a ser disipada será calculada en la sección 3.2.7. y puede tener un menor valor, es una forma de sobredimensionar el conductor de la red. Además, se requiere el valor del tiempo de liberación de la falla que depende de los dispositivos de protección de la subestación y el valor de la temperatura ambiente.

La Tabla 2 muestra las dimensiones de los distintos conductores bajo el estándar estadounidense (AWG o American Wire Gauge) que son valores comerciales usados en la manufactura de cables y conductores, las dimensiones calculadas con la Ecuación (5) deben de aproximarse a un calibre AWG de área igual o superior.

Tabla 2

Calibres de conductores en AWG

Calibre	Sección mm ²	Diámetro mm	Calibre	Sección mm ²	Diámetro mm
AWG16	1.31	1.29	AWG3	26.7	5.83
AWG15	1.65	1.45	AWG2	33.6	6.54
AWG14	2.08	1.63	AWG1	42.4	8.45
AWG13	2.62	1.83	AWG1/0	53.5	9.45
AWG12	3.31	2.05	AWG2/0	67.4	10.65
AWG11	4.17	2.3	AWG3/0	85	11.95
AWG10	5.26	2.59	AWG4/0	107.2	13.4
AWG9	6.63	2.91	AWG250	126.7	14.65
AWG8	8.36	3.26	AWG300	152	16.03
AWG7	10.5	3.66	AWG350	177.8	17.3
AWG6	13.3	4.11	AWG400	202.7	18.48
AWG5	16.8	4.62	AWG450	228.2	19.61
AWG4	21.1	5.19	AWG500	253.4	20.85

Nota: fuente Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Calibre_de_alambre_estadounidense#cite_note-1

Como comentario final indicar que según la Ecuación (5) el cálculo del calibre del conductor no es un valor variable, el cambio de conductores por unos de mayor grosor tiene un efecto mínimo sobre la resistencia de la red; sin embargo, es común sobredimensionar el calibre del conductor por motivos estructurales, especialmente cuando este sea de cobre recocido, pues debe de soportar las fuerzas electromagnéticas ocurridas durante la falla.

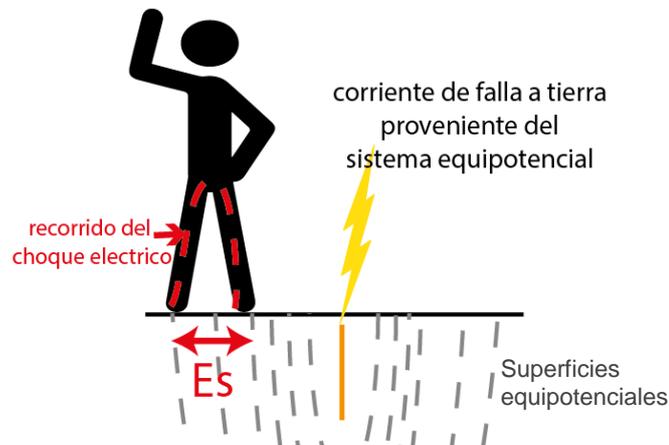
2.1.2.4. Tensiones máximas de toque y de paso

Las tensiones máximas de toque y paso corresponden a un cálculo previo de valores máximos de tensión soportables por el cuerpo humano, dicho cálculo está orientado a proteger al personal que se encuentre en la subestación eléctrica durante una falla en diferentes situaciones.

La tensión de paso, es llamada “*step voltaje*” en inglés y por ello se representa como “*Es*”, se define como la diferencia de potencial experimentada por una persona entre sus pies estando estos distanciados 1 metro, sin tener contacto con algún objeto aterrado, esta tensión ocurre debido a los gradientes de potencial que se forman en el suelo alrededor del aterramiento eléctrico cuando ocurre una falla, como se observa en la Figura 11 cada uno de los pies de una persona termina a diferente potencial propiciando un choque eléctrico entre las piernas.

Figura 11

Esquema de tensión de paso

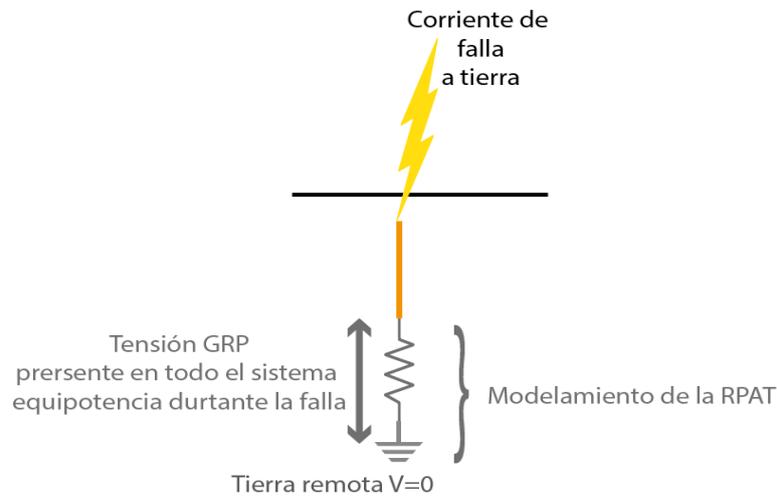


Nota: Elaboración propia

Para entender el efecto de la tensión de toque es necesario conocer que durante una falla a tierra el sistema equipotencial adquiere una tensión, debido a la corriente que pasa a través de la resistencia de puesta a tierra hacia el suelo, este potencial se denomina potencial de tierra o “*Ground Resistance Potencial*” en inglés o “*GRP*” por sus siglas y se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Potencial de tierra durante la falla

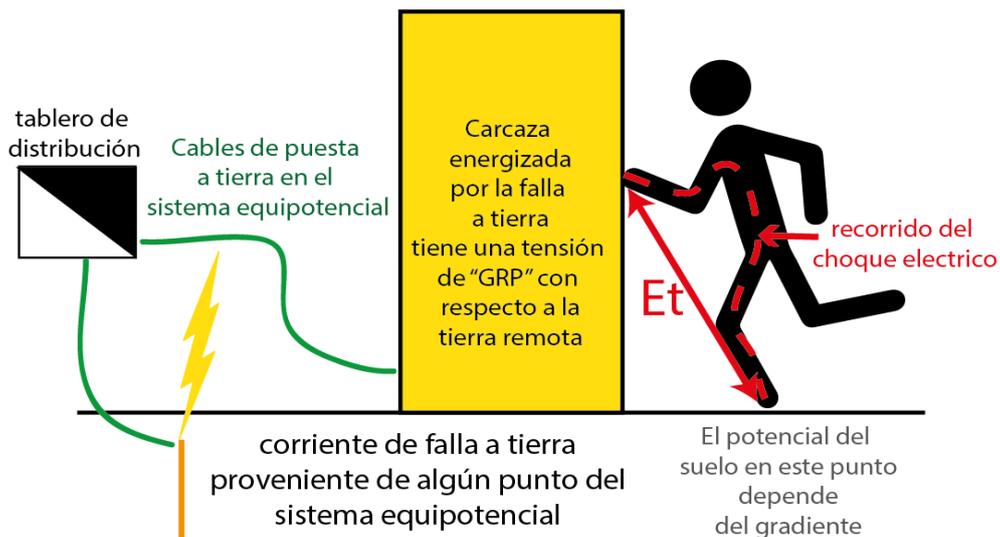


Nota: Elaboración propia

La tensión de toque, o *"touch voltage"* en inglés y por ello se representa como *"Et"*, se define como la diferencia entre el potencial que adquiere el sistema de puesta a tierra durante una falla y el potencial de la superficie donde se encuentra la persona afectada, esta diferencia de potencial ocurre cuando una persona toca un material conductor que forma parte del sistema equipotencial durante una falla. Esto puede verse en la Figura 13.

Figura 13

Esquema de tensión de toque

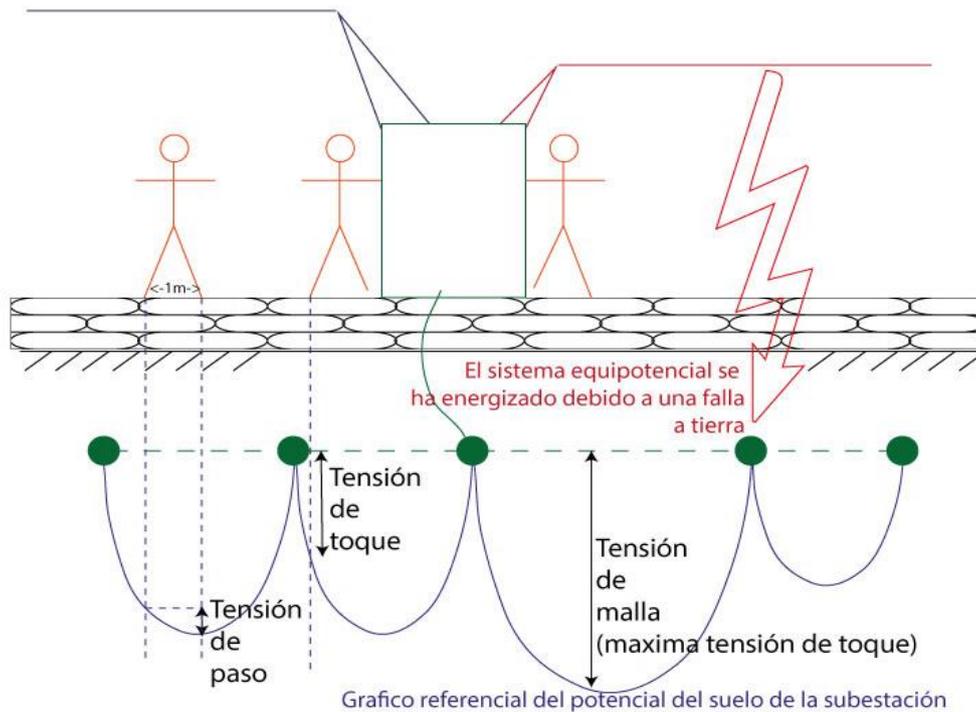


Nota: Elaboración propia

La tensión de paso y la tensión de toque se muestran en la Figura 14. En el contexto de una subestación de transmisión, tomar en cuenta que el peor caso de tensión de toque dentro de una red de puesta a tierra se le denomina tensión de malla.

Figura 14

Tensión de toque y tensión de paso en la subestación de AT



Nota: Elaboración propia

Estos valores corresponden a los valores de tensiones permisibles o soportables por el cuerpo humano se muestran en las Ecuaciones (7), (8), (9) y (10).

$$E_{S-50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots (7)$$

$$E_{S-70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots (8)$$

$$E_{t-50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \dots (9)$$

$$E_{t-70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \dots (10)$$

Donde:

t_s : Tiempo de duración del choque eléctrico en segundos

ρ_s : Resistividad de la capa superior de grava dieléctrica $\Omega\cdot m$

C_s : Factor de reducción.

El factor de reducción se obtiene mediante la Ecuación (11), este factor refleja la resistencia efectiva de los pies de una persona ante la capa de suelo conductor.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s - 0.09} \dots (11)$$

Donde:

ρ : Resistividad del suelo en $\Omega\text{-m}$

h_s : Espesor de la capa superior de grava dieléctrica en m

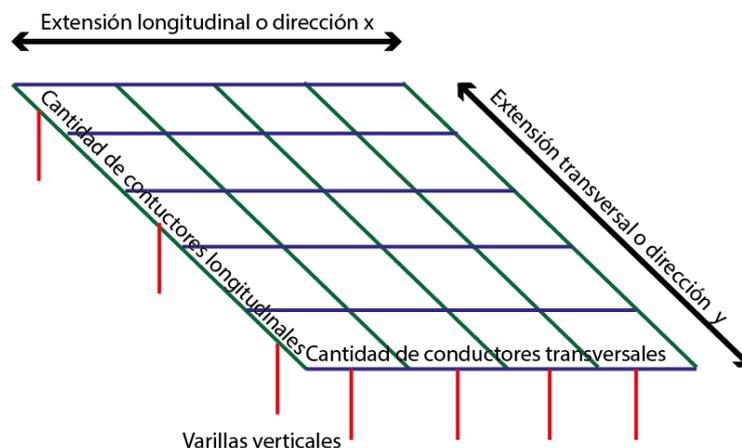
Los valores típicos para h_s son de 5000 $\Omega\text{-m}$ a 2000 $\Omega\text{-m}$, es común aplicar un valor de 2000 $\Omega\text{-m}$ dentro de un criterio pesimista en el análisis.

2.1.2.5. Determinación de diseño o configuración

El diseño consiste en proponer una configuración para la red, es decir características geométricas que la definan físicamente, en el caso de la red de puesta a tierra consiste en definir su extensión y cantidad de conductores longitudinales y transversales, la cantidad de electrodos verticales y la profundidad de enterramiento de la red, como se observa en la Figura 15.

Figura 15

Definición de la configuración de la red de puesta a tierra



Nota: Elaboración propia

Dentro de la configuración hay algunos parámetros normales que condicionan sus valores extremos. El enterramiento de la red suele ser de poca profundidad, normalmente de 0.5 a 2m, también debe considerar que el espaciamiento típico de los conductores es de 15 a 3m formando siempre cuadrículas o mallas cercanas a la forma cuadrada, nunca un rectángulo alargado pues en este caso no se cumplen las ecuaciones del procedimiento de cálculo presente en la IEEE 80, finalmente indicar que es común utilizar varillas de cobre convencionales como electrodos verticales por lo que la excavación de los pozos no excede los 3m. (Lozano Campos, 2020). Todas estas condiciones tienen una repercusión en la resistencia de puesta a tierra, en las tensiones de toque y paso, además en el costo de implementación de la red.

2.1.2.6. Resistencia de la puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra R_g se obtiene de dos formas según corresponda.

La fórmula de Sverak (12) en una fórmula sencilla que brinda una buena aproximación para este cálculo, se prefiere su uso cuando no hay varillas verticales en la configuración. Esta misma fórmula muestra el gran efecto que tiene la extensión de la red sobre la resistencia de la misma, por lo que la extensión longitudinal y transversal deben de ser incluidas en los algoritmos de optimización como variables, ya sea como valores mínimos y máximos o como un valor inicial y un porcentaje de incremento.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{10/A}} \right) \right] \dots (12)$$

Donde:

R_g : Resistencia de tierra de la subestación en Ω

ρ : Resistividad del terreno en Ω -m

A : Área de la malla de tierra en m^2

L : Longitud total de cable enterrado incluyendo varillas en m

h : Profundidad de enterramiento de la red en m

Se aplica la fórmula de Schwarz, observada en (13), cuando se tiene electrodos verticales en la red, esta fórmula consta de una resistencia de la red (14), la resistencia de los electrodos verticales (15) y la resistencia mutua entre ambas (16) lo cual se interpreta como una conexión en paralelo.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \dots (13)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + k_1 \frac{L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \dots (14)$$

$$R_2 = \frac{\rho_{eq}}{2\pi n L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b'} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \dots (15)$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \dots (16)$$

Donde:

R_1 : Resistencia de la red en Ω

R_2 : Resistencia de todas las varillas en Ω

R_{12} : Resistencia mutua entre las varillas y la red, también en Ω

L_c : Longitud total de los conductores longitudinales y transversales usados en la red, en m

L_r : Longitud promedio de las varillas en m

ρ : Resistividad del estrato donde se encuentran los conductores horizontales de la red en $\Omega - m$

ρ_{eq} : Resistividad equivalente definida en la Ecuación (4) en $\Omega - m$

$2b'$: Diámetro de las varillas en m

n : Número de varillas parte de la configuración de la red evaluada

k_1 y k_2 : Constantes relacionadas con la geometría del sistema

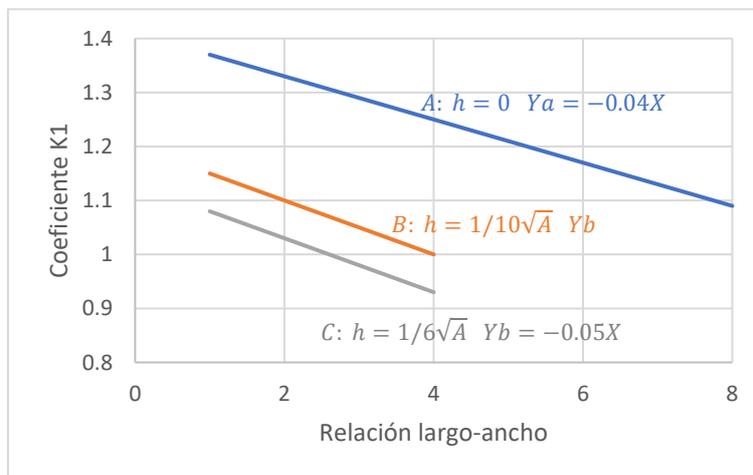
$2a_c$: Diámetro del conductor de la red en m

a' : Radio equivalente, igual a $\sqrt{a_c 2h}$ para un enterramiento h y a_c para conductores en la superficie ($h=0$).

Las constantes k_1 y k_2 se calculan utilizando las gráficas de las Figura 16 y Figura 17, se puede observar en ambas una dependencia con la relación ancho/largo de la malla y del área.

Figura 16

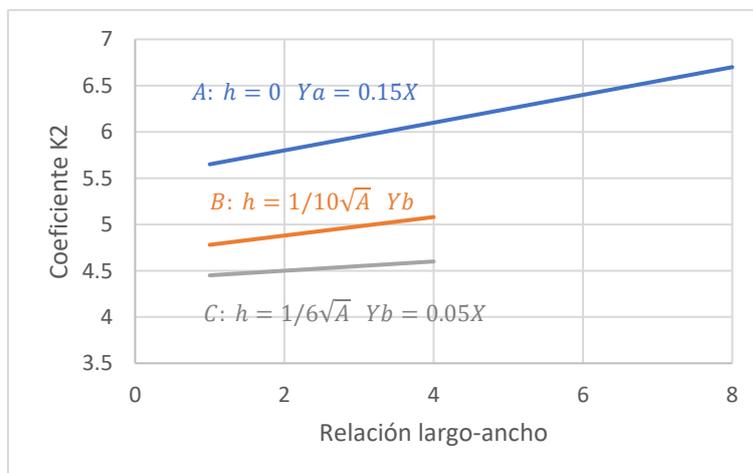
Gráfica de coeficiente k_1 .



Nota: fuente Adaptado de "Figure 25—Coefficients k_1 and k_2 of Schwarz's formula" (IEEE 80)

Figura 17

Gráfica de coeficiente k_2 .



Nota: fuente Adaptado de "Figure 25—Coefficients k_1 and k_2 of Schwarz's formula" (IEEE 80)

Algunos autores simplifican la determinación de los factores k_1 y k_2 a la fórmula intermedia “B” mostradas en la Figura 16 y Figura 17. Kindermann *et.al* (Kindermann & Campagnolo, 2010) consideran las ecuaciones (17) y (18) para los factores k_1 y k_2 respectivamente.

$$k_1 = 1.43 - \frac{2.3 \cdot h}{\sqrt{A}} - 0.044 \cdot \frac{L_x}{L_y} \dots (17)$$

$$k_2 = 5.50 - \frac{8 \cdot h}{\sqrt{A}} - \left(0.15 - \frac{h}{\sqrt{A}}\right) \frac{L_x}{L_y} \dots (18)$$

2.1.2.7. Corriente de la red.

La corriente de la red es un valor inferior a la corriente de falla proveniente de los datos iniciales del problema, para su cálculo la corriente de falla debe afectarse por los siguientes factores, ambos inferiores a la unidad.

El factor S_f es un factor de división de corriente, debido a que la red de puesta a tierra se encuentra conectada mediante cables de guarda con las puestas a tierra de las torres de transmisión y con las redes de puesta a tierra de otras subestaciones, al ocurrir una falla, la corriente se divide entre todo el sistema de puesta a tierra por ello la red propia de la subestación tiene que disipar solo una fracción de la corriente de falla, esta corresponde al factor S_f .

El factor D_f es el factor de decremento que relaciona la corriente rms a tierra y la corriente de falla asimétrica.

La corriente de la red se calcula como indica la Ecuación (19) $I_g = I_{falla} * S_f * D_f$... (19):

$$I_g = I_{falla} * S_f * D_f \dots (19)$$

Donde:

I_g : Corriente a ser disipada por la red a diseñar en A

I_{falla} : Corriente de la mayor falla a tierra posible en la subestación, en A

Debe considerarse que la corriente de la red es aquella que debe disiparse a través de la red de puesta a tierra hacia el suelo en búsqueda de un punto de retorno para cerrar el circuito de falla; sin embargo, en el caso que el transformador tenga el neutro aterrado en el nivel de tensión donde se hayan calculado las fallas más intensas, dicha falla encontrara su camino de retorno al neutro muy fácilmente, sin necesidad de disiparse a través del suelo.

2.1.2.8 Tensiones de toque y paso de la red

Estos valores se calculan a partir de los valores hallados anteriormente, en vez de la tensión de toque se calcula la tensión de malla pues estas representan a la mayor tensión de toque de la red.

La tensión de malla se define según la Ecuación (20).

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_g}{L_M} \dots (20)$$

Donde:

E_m : Tensión de malla en V

K_m : Factor geométrico

K_i : Factor de irregularidad

L_M : Profundidad efectiva de enterramiento

El factor de irregularidad K_m se define según la Ecuación (21).

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} \right) + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \dots (21)$$

Donde:

K_{ii} : Factor igual a 1 cuando hay varillas verticales en el perímetro y es igual a $\frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}}$ cuando las varillas verticales son pocas y no están ubicadas en el perímetro

K_h : Factor de profundidad definido como $\sqrt{1+h}$

n : Número efectivo de conductores paralelos igual a $n_a \cdot n_b = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \cdot \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}}$

L_c : Longitud total del conductor horizontal usado en la red y L_p es el perímetro de la red

El factor de irregularidad K_i se encuentra definido como indica (22).

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \dots (22)$$

La profundidad efectiva de enterramiento L_M cuando no hay varillas verticales o estas son muy pocas, ninguna en el perímetro, se define como indica (23).

$$L_M = L_C + L_R \dots (23)$$

Donde:

L_R : es la longitud total de todas las varillas sumadas en m

Cuando se tenga una mayor cantidad de varillas verticales el valor de L_M se define como se indica en (24)

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \dots (24)$$

Donde:

L_x : Máxima longitud de la red en la dirección x

L_y : Máxima longitud de la red en la dirección y

L_r : Longitud de las varillas en m

La tensión de paso se define como indica la Ecuación (25)

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_g}{L_S} \dots (25)$$

Donde:

L_S : Longitud efectiva de conductor enterrado definida como $0.75L_C + 0.85L_R$, en m

$$K_S: \text{Factor } K_S \text{ se define como } \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

2.1.3. Métodos metaheurísticos:

Los métodos metaheurísticos son aquellos que permiten la solución de problemas no triviales, es decir que requiere un procedimiento para su solución, aprovechando la gran capacidad de procesamiento de los computadores actuales para calcular soluciones cercanas a las requeridas mediante estrategias de búsqueda sobre un dominio definido.

El método metaheurístico llamado "*Evolutionary Simulated Annealing*" resulta de incluir algunas estrategias de los algoritmos evolutivos al método llamado recocido simulado o en inglés "*Simulated Annealing*", a continuación, se explican los métodos mencionados.

2.1.3.1. Recocido simulado:

Este método se basa en el trabajo de Cerny *et. al.* (Černý, 1985), toma como referencia el proceso de recocido de los metales, este proceso consiste en incrementar la temperatura de un metal y después permitir que esta descienda lentamente, permitiendo que los átomos del metal se ordenen en configuraciones más estables, es decir de menor energía.

Este algoritmo es muy semejante a otro algoritmo llamado "hill climbing"(Yang & Solomin, 2021) o escalamiento. El escalamiento consiste en buscar mejores soluciones en el vecindario de la solución actual y reemplazarla, cambiando así a mejores vecindarios sucesivamente y por último a un óptimo local. Este algoritmo no tiene un mecanismo de búsqueda de diferentes zonas del dominio, o exploración, por lo que se

centra solo en la optimización local. La principal ventaja que tiene el recocido simulado frente al escalamiento es que el primero incluye la condición de Metropolis (Metropolis et al., 1953). Esta condición permite incluir soluciones que no mejoran a la solución inicial, siempre y cuando cumpla con un criterio probabilístico definido por la función exponencial de la Ecuación (26) (Kirkpatrick et al., 1983) para expandir la búsqueda evitando que esta quede "atrapada" es un máximo o mínimo local, facilitando la exploración del dominio.

$$\text{función exponencial} = e^{-\left(\frac{Fv-Fa}{To}\right)} \dots (26)$$

Donde:

Fa : Función costo de la solución actual del paso 2

Fv : Función costo de la solución vecina seleccionada en el paso 3

To : Temperatura inicial determinada en el paso 1

Para efectuar esta condición probabilística debe compararse el valor de la función exponencial (26) con un número real aleatorio entre 0 y 1. La solución será aceptada cuando el número aleatorio sea menor a la función exponencial evaluada en la presente iteración.

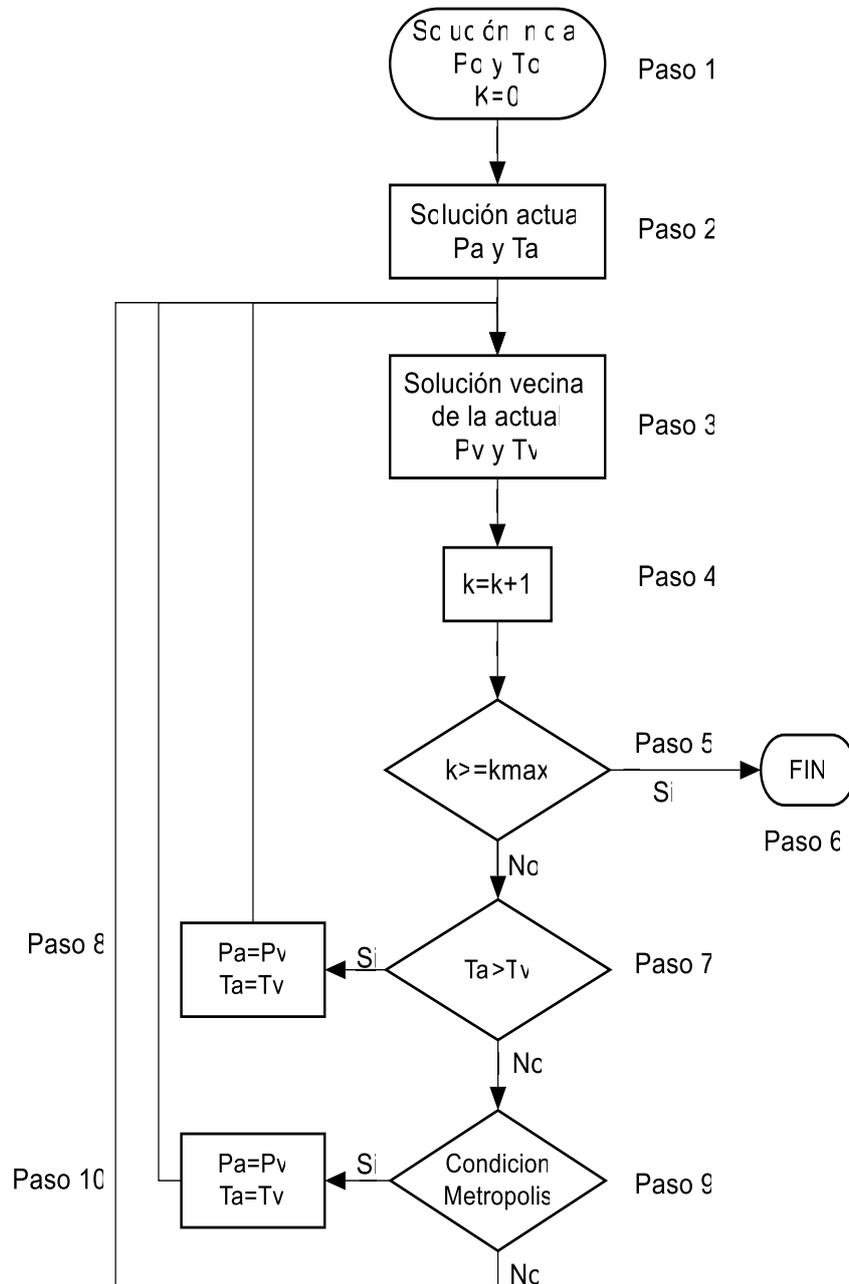
La relación entre la temperatura de una solución y la función costo suele ser de igualdad, pudiendo ser también proporcional. Además, es normal considerar que la temperatura sea igual a la función costo y que la energía sea igual a la diferencia de temperaturas, siendo estas relaciones de proporcionalidad en la física real del recocido de metales (Kirkpatrick et al., 1983).

La definición de vecindario es variable, para el presente trabajo se considera solución vecina a aquella solución aleatoria perteneciente al dominio y que comparta un solo elemento en la misma posición con la solución actual (Araújo, 2019).

El procedimiento de este método metaheurístico se muestra en el diagrama de la Figura 18

Figura 18

Diagrama de flujo de recocido simulado



Nota: Elaboración propia

A continuación, se explica cada uno de los bloques de la Figura 18:

Paso 1: Se selecciona una solución inicial (P_0) o punto del dominio aleatorio y la temperatura inicial (T_0) de esta solución, además se inicia el contador (k).

Paso 2: Se determina la solución y temperatura actual (P_a y T_a) siendo iguales a las iniciales solo en la primera iteración

Paso 3: Se selecciona una solución vecina de la solución inicial (P_v) y se calcula su temperatura (T_v).

Paso 4: Realiza un conteo de iteraciones.

Paso 5: Se comparará el número de iteraciones con el máximo determinado previamente

Paso 6: Si el número de iteraciones llega a ser igual a la cantidad máxima se termina el programa

Paso 7: Se compara la temperatura de la vecina con la temperatura actual.

Paso 8: En caso la temperatura vecina sea menor que la actual, la solución vecina reemplaza a la solución actual.

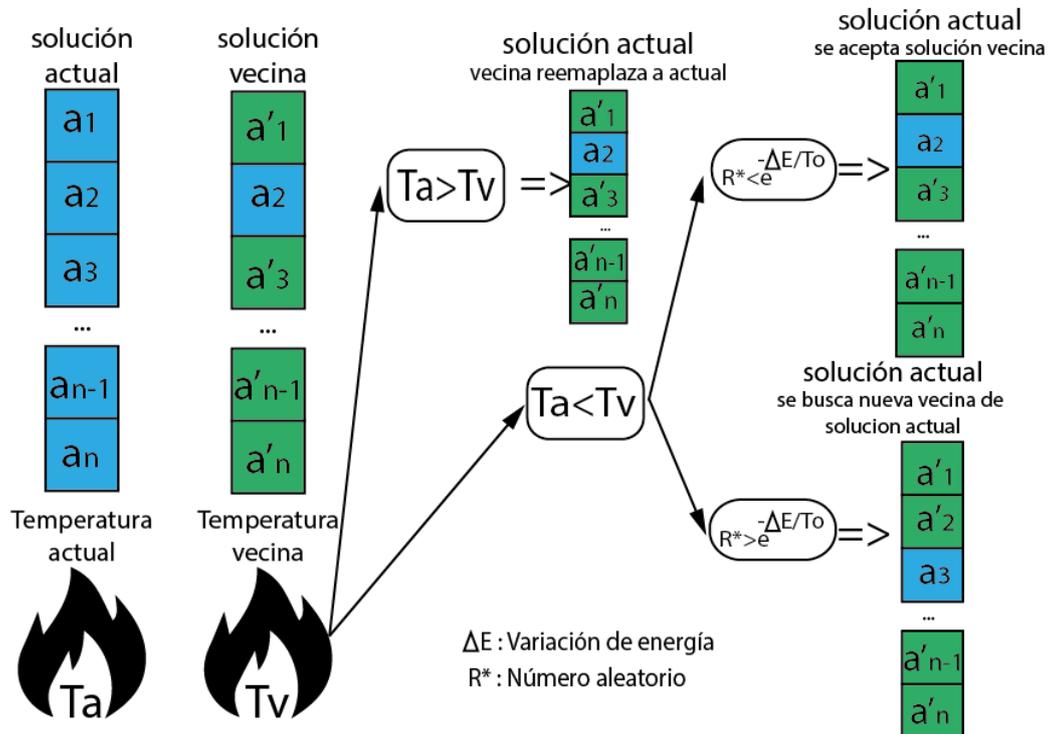
Paso 9: En caso que la temperatura de la vecina sea mayor que la actual, Se calcula la condición de Metrópolis. En caso no se cumpla la condición de Metrópolis, se vuelve al paso 3 a evaluar otra solución vecina

Paso 10: Si cumple la condición de Metrópolis se reemplaza la solución vecina analizada por la actual.

Como puede observarse, previamente a la aplicación de este algoritmo deben de establecerse algunos parámetros y procedimientos como: la función costo y su relación con la temperatura, de limitación del dominio, ya sea éste formado por variables continuas o discretas, la cantidad máxima de iteraciones y la definición de vecindario. La Figura 19 muestra el funcionamiento normal del método de recocido simulado de forma gráfica.

Figura 19

Funcionamiento del método recocido simulado



Nota: Elaboración propia

2.1.3.2. Algoritmos evolutivos:

Estos algoritmos de optimización toman inspiración en el proceso de evolución natural de las especies, en este proceso los individuos luchan por sobrevivir a su entorno y por reproducirse para perpetuar su linaje. La capacidad tanto de reproducirse como de sobrevivir viene dada por sus aptitudes, las cuales son evaluadas constantemente por su medio ambiente (Wang & Sobey, 2020).

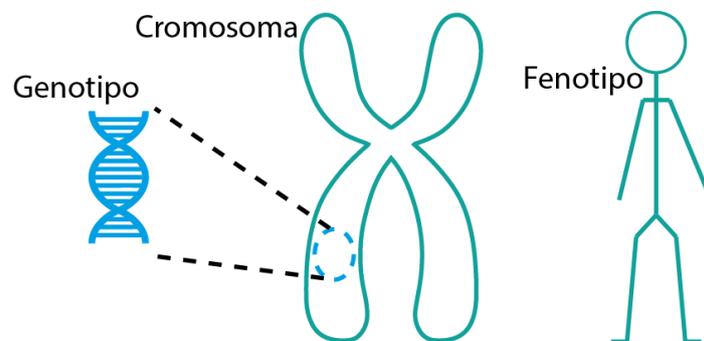
Para modelar el comportamiento anterior debe considerarse que en cada iteración del proceso de optimización se forma una nueva generación de individuos producto de la reproducción de los individuos de la generación anterior, por ello es necesario introducir conceptos de herencia genética.

Todos los seres vivos están conformados por células, las cuales guardan su información genética en el núcleo celular, dentro de unos organelos llamados cromosomas. El número de cromosomas y la cantidad de información almacenada son

característicos de cada especie, y recibe el nombre de genotipo. Existe tanto información general de la especie como información específica que permite a cada individuo ser único. Los códigos generales y específicos escritos en el genotipo se reflejan en las cualidades tangibles del individuo, estas características se denominan fenotipo. Un acercamiento real del fenómeno indica que el fenotipo será evaluado por el entorno del individuo determinando su capacidad de reproducción y supervivencia, esta evaluación se ve reflejada en la llamada “función costo” característica de cada problema de optimización; sin embargo, para facilidad de los métodos de optimización se considera que la capacidad de supervivencia y reproducción será dependiente del genotipo o codificación genética del individuo, es decir, se elimina el fenotipo como intermediario en el algoritmo. La Figura 20 refleja las relaciones planteadas en el presente párrafo.

Figura 20

Diferencia entre genotipo y fenotipo



Nota: Elaboración propia

Durante la reproducción se realizan dos procesos que permiten generar individuos diferentes a sus antecesores, estos son la recombinación genética o entrecruzamiento y las mutaciones.

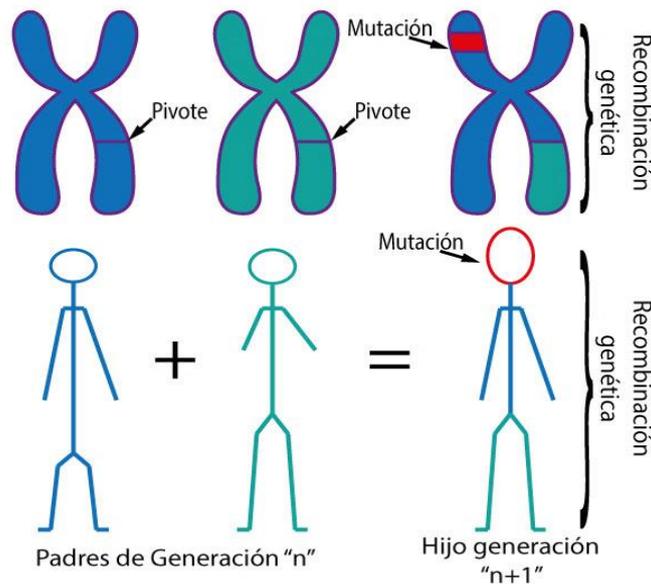
La recombinación genética o entrecruzamiento se caracteriza por generar un código genético nuevo para cada individuo de la nueva generación a partir del código genético de los padres. Esta recombinación en la naturaleza se realiza considerando un punto de pivoteo aleatorio como se muestra en la Figura 21.

Dentro de los algoritmos de optimización pueden considerarse otras estrategias de recombinación diferentes al pivoteo, esta recombinación genética permite realizar una búsqueda local con la posibilidad de encontrar en un máximo o mínimo local dentro del dominio.

Las mutaciones consisten en cambios aleatorios de los genes producidos durante la recombinación genética, eso permite que algunos individuos resultantes tengan características especiales e inesperadas reflejadas en su fenotipo y por ello reflejadas en una mayor o menor capacidad de enfrentar a su entorno (función costo). La Figura 21 muestra el efecto de la recombinación y mutaciones.

Figura 21

Recombinación genética y mutación



Nota: Elaboración propia

Aquellas mutaciones favorables para la supervivencia serán heredadas a las siguientes generaciones, Esto tiene un efecto sobre la exploración del dominio permitiendo la inclusión de nuevos máximos y mínimos locales en el proceso, puede ser alguno de ellos el óptimo global de la función.

Finalmente se debe de tomar en cuenta que la selección de individuos aptos para reproducirse y pasar sus genes a futuras generaciones suele considerar un criterio

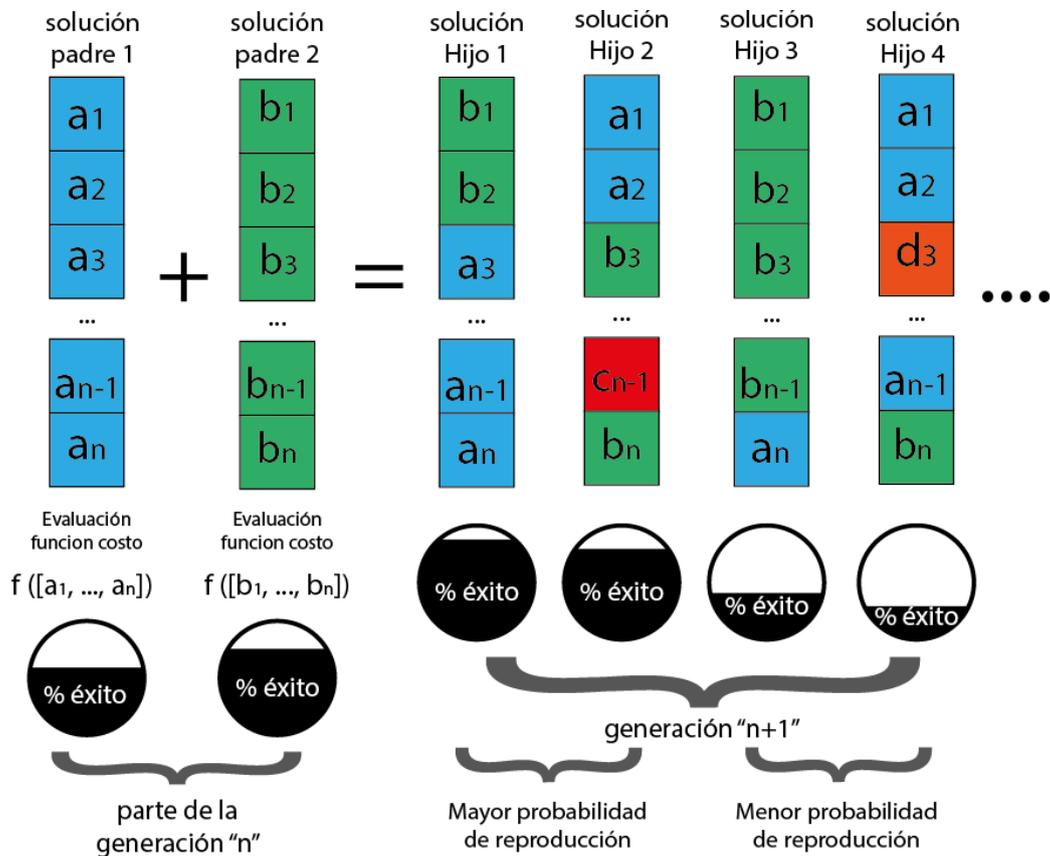
elitista, donde aquellos individuos con mayores capacidades de adaptarse a su entorno tendrán mayor posibilidad de sobrevivir y reproducirse incluso una mayor cantidad de veces (Yan & Kongyu, 2008).

Dentro de los algoritmos evolutivos se encuentran la programación genética, orientada al modelado de procesos, las estrategias evolutivas, centradas en encontrar diversas formas de mutaciones que permitan una mejor exploración del dominio continuo. Los algoritmos genéticos también forman parte de los algoritmos evolutivos, son un método de optimización en sí mismos y se usan mayormente en dominios discretos (Eiben & Smith, 2016).

La Figura 22 muestra de forma gráfica el algoritmo genético aplicado a un vector con datos pertenecientes al dominio de un problema de optimización.

Figura 22

Diagrama funcional de algoritmo genético

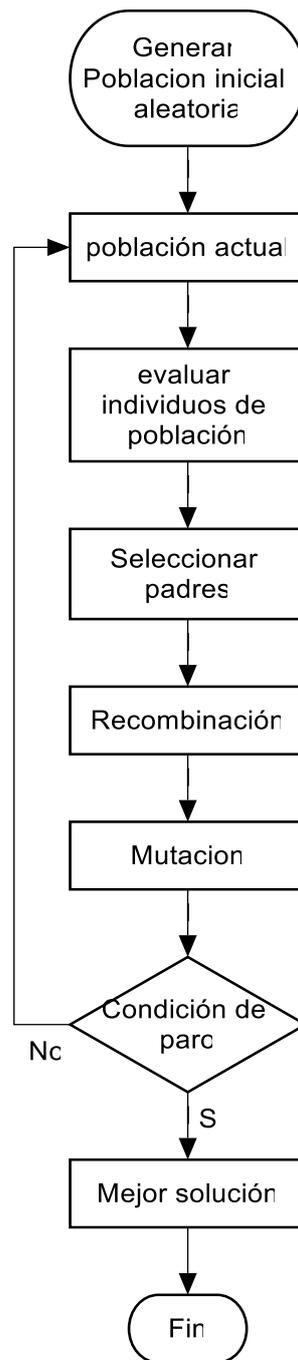


Nota: Elaboración propia

La Figura 23 refleja la programación de un algoritmo genético estándar, no se realiza la descripción de los pasos pues son suficientemente explícitos y corresponde claramente al funcionamiento descrito en párrafos anteriores.

Figura 23

Diagrama de flujo de algoritmo genético básico



Nota: Elaboración propia

2.1.4. Herramientas informáticas

2.1.4.1. Python

Python es un lenguaje de programación interpretado y de alto nivel que se ha convertido en una de las herramientas más populares en la programación de algoritmos y la ciencia de datos. Debido a su sintaxis clara y sencilla, Python es un lenguaje de programación muy usado en la implementación de métodos metaheurísticos aplicados desde la ingeniería hasta la investigación en ciencias sociales (González Duque, 2015).

Los métodos metaheurísticos son algoritmos de optimización que se utilizan para resolver problemas complejos en los que la búsqueda de la solución óptima no es trivial. Estos métodos están diseñados para encontrar soluciones aceptables en un tiempo razonable, aunque no garantizan la obtención de la solución óptima en todos los casos. Algunos ejemplos de métodos metaheurísticos incluyen el algoritmo genético, el recocido simulado y la búsqueda de enjambre. Python es un lenguaje de programación que se ha convertido en una herramienta fundamental para la programación de algoritmos de optimización y la ciencia de datos. Su sintaxis clara y sencilla, así como sus bibliotecas especializadas, lo convierten en una excelente opción para el desarrollo de métodos metaheurísticos.

2.1.4.2. Electrical Transient and Analysis Program (ETAP)

El software de simulación de sistemas de potencia ETAP ha sido ampliamente utilizado en la industria eléctrica para diseñar, analizar y optimizar sistemas eléctricos de potencia. ETAP cuenta con herramientas de modelado de sistemas de potencia, análisis de cortocircuito, flujo de carga, estabilidad de voltaje y simulación de transitorios electromagnéticos (Brown et al., 1990). Además, también cuenta con herramientas para el análisis de la calidad de la energía, la coordinación de protecciones y la simulación de sistemas de distribución y subtransmisión.

Uno de los análisis importantes en un sistema de puesta a tierra es el cálculo de la resistencia de tierra. ETAP puede ser utilizado para calcular la resistencia de tierra de un sistema de puesta a tierra utilizando diferentes métodos de cálculo como el método de Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. También se pueden modelar diferentes configuraciones de electrodos de puesta a tierra y analizar su efecto en la resistencia de tierra.

ETAP también puede ser utilizado para simular la corriente de falla en una red de puesta a tierra y evaluar la efectividad del diseño de la red de puesta a tierra. Esto es importante para garantizar la seguridad de las personas y la protección de los equipos eléctricos. Además, ETAP también puede ser utilizado para analizar los efectos de las fallas en una red de puesta a tierra, lo que permite una mejor comprensión del comportamiento del sistema y ayuda a desarrollar estrategias de mitigación de riesgos (Payshetti et al., 2017).

2.2. Marco Conceptual

Sistemas de puesta a tierra: Los sistemas de puesta a tierra son conjuntos de elementos y estructuras diseñados para proporcionar una conexión segura y controlada entre equipos o sistemas eléctricos y la tierra, con el fin de garantizar la seguridad de las personas y proteger los equipos ante la presencia de corrientes indeseadas o fallas eléctricas.

Red de puesta a tierra: Una red de puesta a tierra es una estructura metálica enterrada o conectada a tierra, que se diseña con el propósito de proporcionar un camino de baja resistencia eléctrica hacia la tierra. Su función principal es disipar las corrientes no deseadas que pudieran generarse debido a fallas eléctricas o descargas atmosféricas, garantizando la seguridad de las personas y equipos conectados a la red eléctrica.

Choque eléctrico: El choque eléctrico ocurre cuando una persona entra en contacto con un elemento o equipo eléctrico que está bajo tensión y se cierra el circuito eléctrico a través del cuerpo humano. Esta situación puede causar una corriente eléctrica a través del cuerpo, lo que puede resultar en lesiones graves o incluso la muerte.

Falla a tierra: Una falla a tierra se produce cuando un conductor eléctrico entra en contacto directo con una estructura metálica o con el suelo, provocando una desviación de la corriente eléctrica hacia la tierra. Esto puede dar lugar a un aumento significativo de la corriente, lo que podría dañar el equipo o poner en riesgo la seguridad de las personas.

Tensión de toque: La tensión de toque se refiere al voltaje que se produce en una estructura metálica o en el suelo cercano a un conductor o equipo eléctrico bajo tensión. Si una persona toca una superficie con una tensión de toque, podría recibir una

descarga eléctrica si está en contacto con la tierra o con otra superficie de potencial diferente.

Tensión de paso: La tensión de paso es el voltaje que se establece entre los pies de una persona que camina o se encuentra cerca de una estructura o conductor eléctrico bajo tensión. Si la tensión de paso es lo suficientemente alta y la resistencia del suelo es baja, podría fluir una corriente eléctrica a través del cuerpo humano, lo que representa un peligro para la seguridad.

Resistencia de puesta a tierra: La resistencia de puesta a tierra es la medida de la oposición que presenta una red de puesta a tierra al paso de la corriente eléctrica hacia la tierra. Se expresa en ohmios y una resistencia baja es deseable para garantizar una eficiente disipación de corrientes de falla o descargas eléctricas, lo que contribuye a la seguridad de las personas y equipos.

Configuración de la red de puesta a tierra: La configuración de la red de puesta a tierra hace referencia a la disposición y diseño específico de los elementos y conexiones que conforman el sistema de puesta a tierra. Esta configuración puede variar según las necesidades y características del sistema eléctrico, y su correcta planificación es esencial para lograr una red de puesta a tierra segura y efectiva.

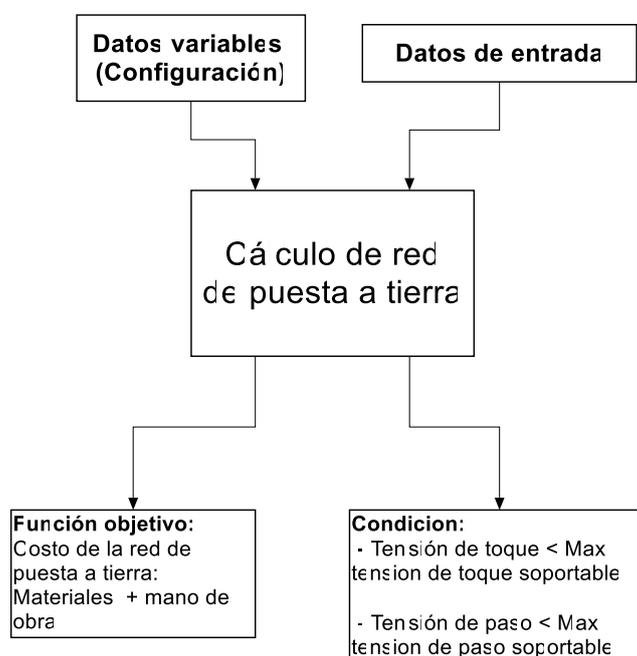
Capítulo III. Análisis y discusión de resultados

3.1. Programa para el cálculo de la red de puesta a tierra

En esta sección se mostrará y explicará el código realizado en Python para programar las herramientas de cálculo y optimizaciones propuestas en el fundamento teórico. El cálculo de las redes de puesta a tierra requiere realizar los cálculos explicados en la sección anterior, el flujo de datos se muestra en la **Figura 24**.

Figura 24

Flujo de datos en el cálculo de redes de puesta a tierra



Nota: Elaboración propia

Los datos de entrada son valores constantes dentro del análisis y se detallan a continuación.

L1: Medida transversal inicial de la red de puesta a tierra, m

L2: Medida longitudinal inicial de la red de puesta a tierra, m

ro: Resistividad del terreno en Ω -m

Icond: Mayor corriente eficaz de falla en la subestación en A

ts: Tiempo del shock eléctrico o tiempo de despeje de la falla

T_a : Temperatura ambiente en °C

ρ_{os} : Resistividad de la grava en $\Omega\cdot m$

$SfDf$: Multiplicación de los factores de división y decremento de corriente

$\rho_{densgrava}$: Es la densidad de la grava usada, en kg/m^3

I_{grp} : Máxima corriente a ser disipada hacia el suelo en A

ρ_{recl} : En caso haya un recloser en la línea considerada para I_{cond} se coloca la cantidad de recierres. en caso no hayan recierres, vale 1.

ρ_{peso} : Siendo el peso de referencia de una persona esto afecta a las condiciones de tensión de toque y tensión de paso, el estado del arte contempla dos opciones de pesos: 50kg y 70kg.

$\rho_{conductor}$: En caso el conductor seleccionado a partir de la corriente de falla sea muy delgado tal que no soporte los esfuerzos mecánicos de la falla se reemplaza por uno más grueso, este valor debe de indicarse como la posición en la Tabla 2, en caso de colocar cero el programa usará el conductor calculado con las fórmulas explicadas en secciones anteriores.

Los datos variables correspondientes a la configuración de la red de puesta a tierra se explican a continuación:

$n1$: Es la cantidad de conductores transversales, considera valores enteros tal que el espaciamiento esté entre 2 y 15m dentro de la longitud $L2$.

$n2$: Es la cantidad de conductores longitudinales, tiene el mismo dominio que $n1$, pero dentro de la longitud $L1$.

$x1$: Es el factor de crecimiento transversal de la red (siempre mayor que 1), afecta a la constante $L1$, el dominio consta de los números con dos decimales entre el 1 y el factor $x1$.

x_2 : Es el factor de crecimiento longitudinal de la red (siempre mayor que 1), afecta a la constante L_2 , el dominio consta de los números con dos decimales entre el 1 y el factor x_2 .

nr : Es un factor de dos decimales entre 0 y 1 que determina la cantidad de varillas de puesta tierra. En el presente algoritmo la cantidad de varillas depende de la cantidad de cruces, siendo inferior a ésta, debe ser múltiplo de cuatro (por simetría en la red rectangular) y se define como indica (27).

$$nr = 4 * \text{redondeo}(n_1 * n_2 * nr/4) \dots (27)$$

L_v : Es la longitud de las varillas verticales, el dominio está conformado por valores entre 0 y 2.4 con intervalo de 0.1, el valor de 2.4 metros de longitud máxima es para evitar excavaciones de más de 2.4 metros, pues serían poco prácticas y excederían la longitud de un electrodo convencional.

bb : Es el diámetro de las varillas verticales, en los próximos cálculos se considera el electrodo convencional de 3/4", es decir 0.1905mm.

mat : Indica la posición en la Tabla 1, su dominio son los números enteros entre 0 y 8, esta Tabla contiene las características de los materiales usados como conductor en la red. En los próximos cálculos se ha restringido su dominio a solo el valor "0" (cobre recocido).

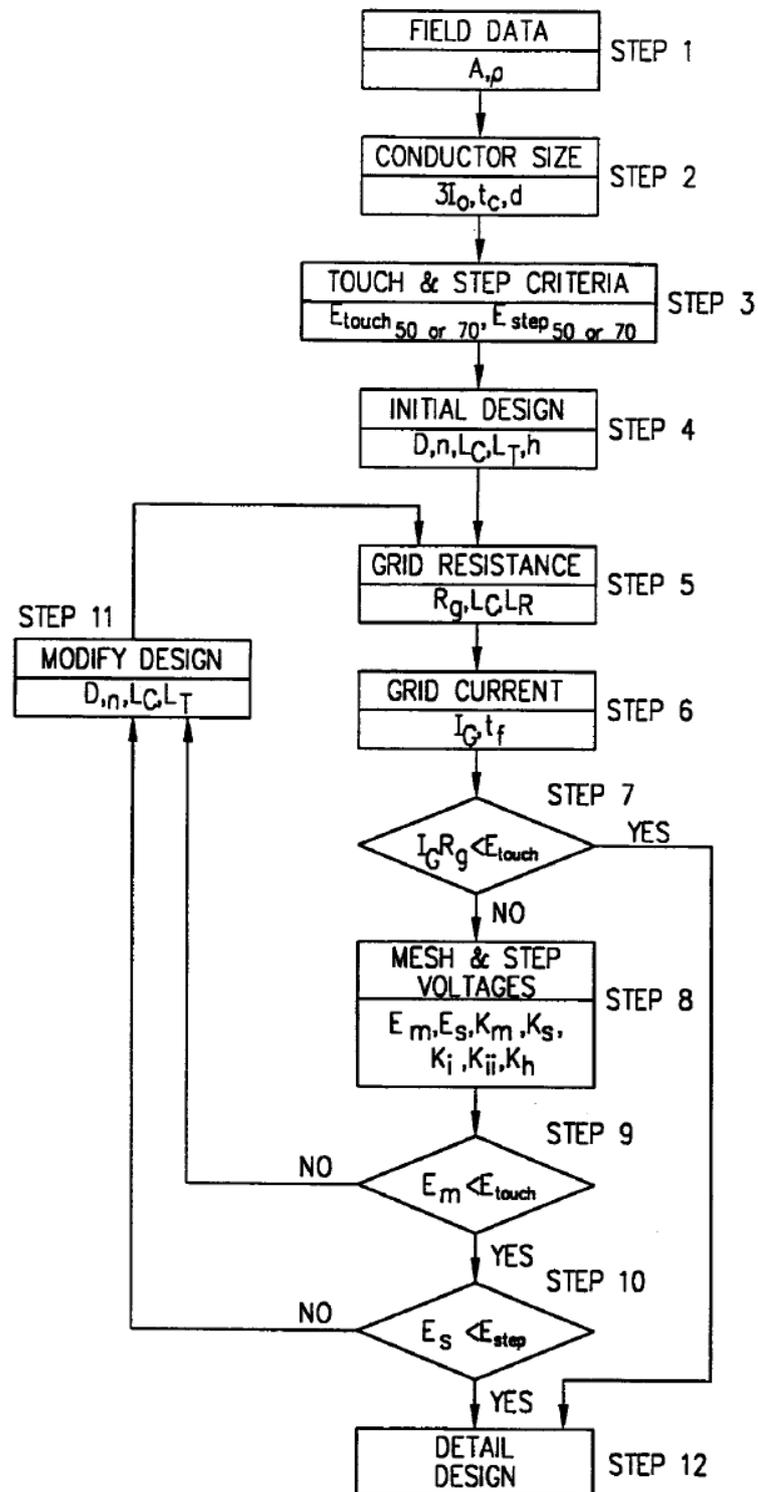
h : Es la profundidad de enterrado de la red de puesta a tierra en metros, el dominio se encuentre en los números entre 0 y h con un decimal.

hg : Es el espesor de la capa de grava superior en metros, el dominio se encuentre en los números reales con un decimal entre 0 y h .

La Figura 25 muestra el diagrama de flujo para el cálculo de la red de puesta a tierra utilizado en el presente estudio. el algoritmo mostrado corresponde a la Figura. 33 de la norma IEEE 80.

Figura 25

Diagrama de flujo para cálculo de red de puesta a tierra.



Nota: fuente Tomado de "Figure 33—Design procedure block diagram" (IEEE 80)

3.1.1 Función costo

La función costo debe reflejar a grandes rasgos la inversión necesaria en materiales para la construcción de la red de puesta a tierra. La función usada en este estudio se desarrolla a partir del trabajo de CHOU *et. al.* (Chou, 1998) donde considera los costos de soldadura, excavación y pozos como se muestra en la Ecuación (28).

$$\text{Costo} = \text{Sold} + \text{Excv} + \text{Pozos} \dots (28)$$

La única diferencia aplicada en el presente trabajo es la distinción entre uniones soldadas tipo "T" y tipo cruz. La definición de cada componente de la función costo de detallan en los siguientes párrafos.

Soldadura exotérmica considera parte del costo del molde (pues este sirve para una cantidad determinada de soldaduras), la carga y la mecha diferenciando entre conector tipo cruz para el cruce de los conductores de la red horizontal y conectores tipo "T" para la unión de las varillas verticales y las conexiones en el perímetro de la red horizontal como se muestra en las ecuaciones de (29) a (32). Se excluyen las soldaduras tipo "T" de donde salen las derivaciones a los equipos de la subestación pues estas son independientes de la configuración de la red.

$$\text{SoldT1} = \text{CuSolt1} \cdot (2 \cdot (n1 - 1) + 2 \cdot (n2 - 1)) \dots (29)$$

$$\text{SoltT2} = \text{CuSolt2} \cdot (nr) \dots (30)$$

$$\text{SoldX} = \text{CuSolx} \cdot (n1 - 1) \cdot (n2 - 1) \dots (31)$$

$$\text{Sold} = \text{SoldT1} + \text{SoldT2} + \text{SoldX} \dots (32)$$

Donde:

Sold: Es el costo total de soldaduras en la red de puesta a tierra

SoldT1: Es el costo total de soldaduras tipo T para la periferia de la red

CuSolt1: Es el costo unitario de las soldaduras tipo T para la periferia en $\frac{\$/}{\text{unidad}}$

SoltT2: Es el costo total de soldaduras para las varillas verticales

$CuSolt2$: Es el costo unitario de las soldaduras tipo T para varillas en $\frac{S/}{unidad}$

$SoldX$: Es el costo total de soldaduras tipo cruz usadas en el cruce de conductores

$CuSolx$: Es el costo unitario de las soldaduras tipo cruz para conductores $\frac{S/}{unidad}$

La excavación considera el volumen requerido para la capa de grava, con una profundidad hg , además del volumen de las zanjas, de un metro de ancho y h metros de profundidad, necesarias para la colocación de los conductores horizontales de la red de puesta a tierra como se muestra en la Ecuación (33). Para el presente modelo no se ha considerado un entablillado para las zanjas, pero debería de considerarse como un costo adicional en caso de trabajar sobre tierra movida o arenosa.

$$Exc_v = CuExc_v \cdot L1 \cdot L2 \cdot hg + (L1 \cdot n2 + L2 \cdot n1) \cdot h \dots (33)$$

Donde:

Exc_v : Es el costo total de excavación

$CuExc_v$: Es el costo unitario por metro cubico de excavación $\frac{S/}{m^3}$

El costo de los pozos de puesta a tierra corresponde a las varillas verticales y es proporcional a la longitud de estos como muestra la Ecuación (34).

$$Pozos = CuPozos \cdot nr \cdot \frac{Lv}{2.4} \dots (34)$$

Donde

$Pozos$: Es el costo total de los pozos verticales

$CuPozos$: Costo unitario de pozo de puesta a tierra considerando una varilla convencional de 2.4m en $\frac{S/}{unidad}$.

Costo de material de la red horizontal de puesta a tierra, considera solo el costo de los conductores como se indica en (35).

$$Conduc = Ac \cdot (n2 \cdot L1 + n1 \cdot L2) \cdot Dens \cdot CuMat \dots (35)$$

Donde:

Dens: es la densidad del cobre igual a 8960 kg/m³

CuMat: es el costo unitario del material conductor, es este caso cobre $\frac{S/}{kg}$

Ac: Es la sección de cobre utilizada para la red horizontal

Los costos unitarios considerados en este trabajo se muestran en la Tabla 3. cabe destacar que dichos costos son referenciales, estos deben de actualizarse al realizar un análisis específico según los costos de los proveedores.

Tabla 3

Costos unitarios considerados en el presente estudio

Costo unitario	Valor	Costo unitario	Valor
CuSolt1	100	CuExcV	167
CuSolt2	90	CuPozos	400
CuSolx	120	CuMat	40

Nota: Elaboración Propia

3.1.2 Limitaciones o condiciones

Según lo planteado, no todas las configuraciones de redes de puesta a tierra cumplen con los requisitos de tener tensiones de toque y paso inferiores a los límites planteados en las ecuaciones del (7) al (10), además se tienen dos limitaciones adicionales: la resistencia de puesta a tierra debe ser inferior a 1 y cada malla dentro de la red debe ser aproximadamente cuadrada, por ello se considera que la relación entre lados de cada malla (cuadrícula) se encuentre entre 0.9 y 1.1.

Aquellas configuraciones que no cumplan con alguna de las condiciones mencionadas no serán consideradas soluciones y por ello no formarán parte del dominio de la función costo, ante ello el programa de optimización deberá buscar otras soluciones, ya sean vecinas en el caso del algoritmo de recocido simulado o descendientes en el caso de algoritmos genéticos.

3.1.3 Algoritmo Evolutive Simulated Annealing (ESA)

El algoritmo planteado para la optimización de redes de puesta a tierra en este proyecto presenta elementos de los métodos de Recocido Simulado y de Algoritmos genéticos, cumpliendo con lo siguiente.

- El proceso de recocido simulado parte de una solución aleatoria y realiza la optimización de la misma, sin embargo, es necesario contar con una población para poder aplicar los algoritmos genéticos, por ello es necesario iniciar el proceso de recocido simulado sobre un conjunto de "N" soluciones aleatorias iniciales y optimizarlas simultáneamente.
- Como se indicó en la sección "limitaciones o condiciones", existen 4 condiciones que debe de cumplirse para aceptar una solución vecina, en caso de no cumplirse alguna de ellas se requiere buscar una nueva solución vecina.
- Durante la aplicación del método de "N" recocidos simulados simultáneos se tomarán 2 definiciones de vecindario de forma alternada, una será la explicada en el marco teórico y otra, la conformada por operaciones de entrecruzamiento y mutación, pertenecientes a la teoría de algoritmos genéticos; el cambio de definición de vecindario se realizará cada "M" iteraciones.
- Con el fin de permitir la búsqueda de nuevas soluciones usando los algoritmos genéticos es necesario incentivar la diversidad en la población, por ello debe evitarse la repetición de soluciones durante una misma iteración del proceso de recocido simulado simultaneo y en la aplicación de algoritmos genéticos.
- El entrecruzamiento se realiza entre todas las soluciones obtenidas por el método de recocido simulado hasta ese momento siempre que sean distintas, dando un total de $\frac{N \cdot (N-1)}{2}$ cruces, obteniéndose "p" descendientes por pareja.

Totalizando una cantidad de $p \cdot \frac{(N-1)^2}{2}$ individuos en la nueva generación.

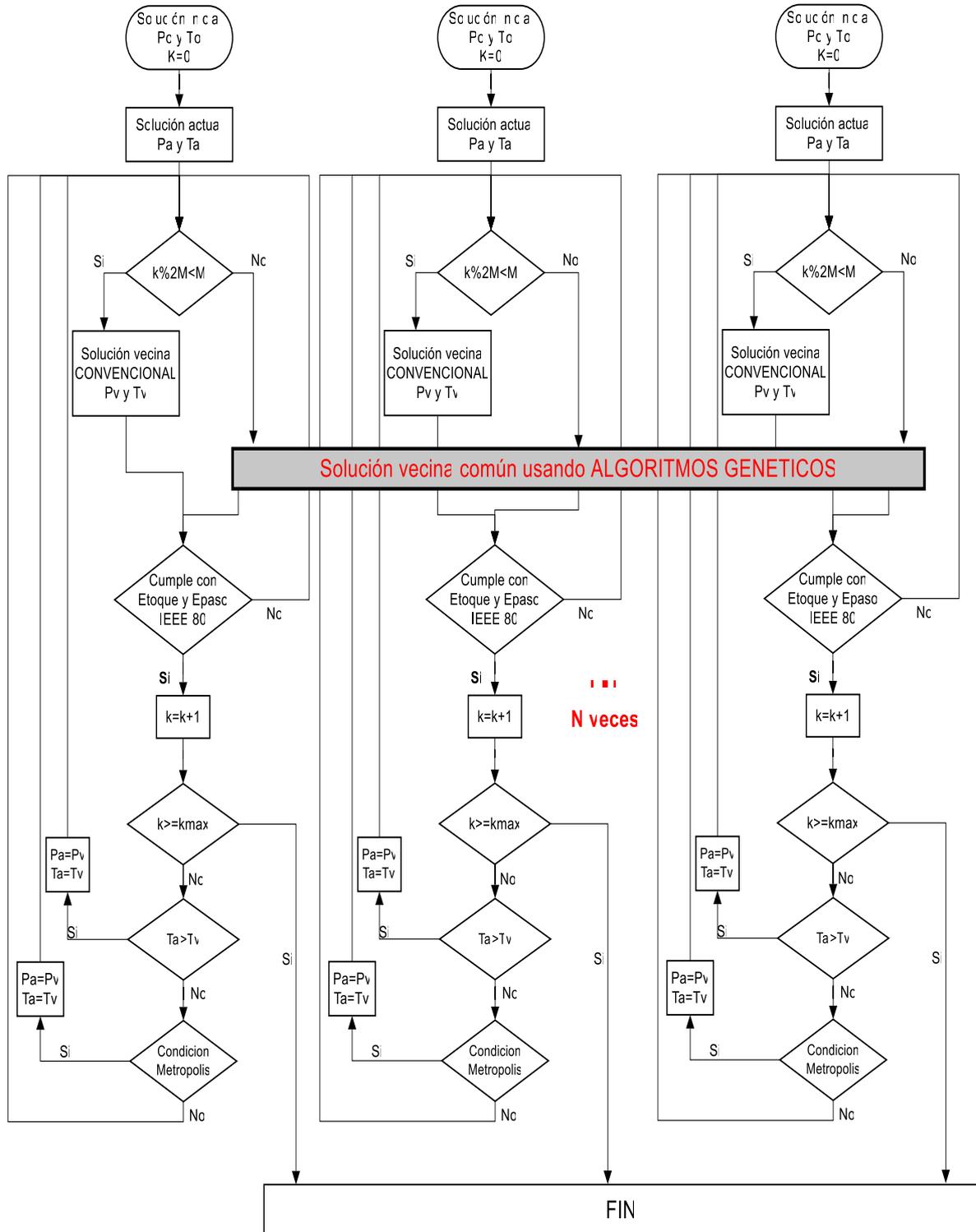
- La estructuración del código genético del nuevo individuo (configuración) a partir del de sus padres es completamente aleatoria, no se considera un pivote, sino que la colaboración genética de cada padre será aleatoria pero complementaria.
- Entre los descendientes del entrecruzamiento se realizan mutaciones de modo aleatorio con un 50% de probabilidad de cambiar alguna componente de la configuración y un 25% de cambiar una segunda variable diferente a la anterior, esto es necesario para favorecer las probabilidades de encontrar una solución vecina que cumpla las limitaciones de una red de puesta a tierra.
- La selección de las “N” soluciones vecinas necesarias para proseguir con el método de recocido simulado sigue un criterio elitista eligiéndose las mejores soluciones de la nueva generación.
- Se seguirá el procedimiento hasta cumplirse la cantidad de iteraciones preestablecidas.

El procedimiento propuesto tiene por objetivo que la alternancia de definiciones de vecindario, de algoritmos genéticos y convencional, permitan tener periodos de búsqueda local y exploración de dominio, respectivamente.

El diagrama de flujo de la Figura 26 muestra el procedimiento a programar para realizar la optimización por “*evolutive simulated annealing*” formado por N recocido simulados y una etapa común de determinación de vecindario por algoritmos genéticos.

Figura 26

Diagrama de método ESA



Nota: Elaboración propia

Capítulo IV. Análisis de Resultados

En esta sección se muestran los efectos que tiene el método de optimización propuesto sobre cálculo de redes de puesta a tierra considerando su influencia en las tensiones de toque y paso, en la resistencia de PAT, en la configuración de la red y finalmente en el costo de implementación de la red.

4.1 Casos de estudio

Los casos donde se aplicará el proceso de optimización a estudiar son los siguientes:

4.1.1 Caso 1: Anexo B de la IEEE 80.

La norma IEEE 80 presenta en su anexo B varios ejemplos de aplicación del método de cálculo presente en el contenido de la misma. el ejemplo 3 es uno de los más completos pues se trata de una red rectangular con electrodos verticales. Los datos iniciales y de la configuración, o constantes de entrada y variables respectivamente en el contexto del programa implementado, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos de entrada de la red para el ejemplo 3 de la IEEE 80

Datos de ingreso		Datos variables:	
L1	84 m	n1	10 unidades
L2	63 m	n2	13 unidades
ro	400 Ω -m	nr	38 unidades
lcond	6814 A	Lv	10 m
ts	0.5 s	bb	10 mm
Ta	40 °C	mat	0 (cobre recocido)
ros	2500 Ω -m	h	0.5m
SfDf	0.6	hg	0.102m
lgrp	3180	x1	1
reclo	1	x2	1
conductor	0		
peso	70		

Nota: Elaboración propia

Realizando el cálculo del conductor se obtiene un calibre de 4 AWG para la red, sin embargo, la referencia hace el cambio por conductor de calibre 2/0 AWG para asegurar que la red soporte los esfuerzos mecánicos durante fallas, las dimensiones del calibre seleccionado se encuentran en la posición 19 de la Tabla 2. Además, es importante acotar que la norma considera el diámetro del conductor 2/0 AWG como 0.01m en vez de usar el dato de la Tabla 2 que es 0.01052m

Los datos de tensiones limitantes de paso y toque son $E_{tmax} = 838.2V$ y $E_{smax} = 2686.6V$ y la tensión de malla para esta configuración es $E_m = 595.8V$, la referencia no calcula la tensión de paso debido a una evidente sobredimensión y la resistencia de puesta a tierra es 2.62 ohm .

4.1.2 Caso 2: Tesis

Esta tesis tiene por título "*Malla a tierra en una área arenosa y protección S.E. HI del proyecto Renovables Chanchamayo*" (Maita Cipriano, 2018), en esta tesis se aplica el procedimiento de la norma IEEE 80 realizando variaciones hasta encontrar una red que cumpla con los criterios de resistencia y tensiones límites, en el proceso incluyen también el tratamiento del suelo reduciendo su resistividad desde 400Ω hasta 43.25Ω . Los datos constantes y variables se muestran en la Tabla 5

Tabla 5

Datos de entrada para caso de Tesis

Datos de ingreso		Datos variables:	
L1	56.5 m	n1	9 unidades
L2	40 m	n2	15 unidades
ro	43.25 Ω -m	nr	17 unidades
lcond	10000 A	Lv	2.5 m
ts	0.25 s	bb	10.998 mm
Ta	40 °C	mat	0 (cobre recocido)
ros	3000 Ω -m	h	0.8m
SfDf	0.84678	hg	1m
lgrp	10000 A	x1	1
recl	1	x2	1
conductor	0 (por determinar)		
peso	50		

Nota: Elaboración propia

El cálculo del conductor para la red de puesta a tierra en ambos casos refiere un calibre AWG 4, en este caso no ha sido cambiado por uno de mayor sección.

Los valores de tensiones limitantes de paso y toque son $E_{tmax} = 1231.7V$ y $E_{smax} = 4230.76V$ y los valores de tensiones de paso y malla obtenidos son de $E_m = 406.02V$ y $E_s = 336.51V$, finalmente la resistencia de puesta a tierra es 0.427 ohm . Cabe destacar que esta referencia realiza el cálculo de los factores k_1 y k_2 de una forma

alternativa (Kercel, 1981), no usando el método gráfico descrito en las ecuaciones de Schwartz detalladas en el estándar IEEE 80.

4.1.3 Caso 3: Caso real

Se presentan los cálculos relacionados a una red de puesta a tierra implementada en la selva peruana la cual fue diseñada con un procedimiento de cálculo diferente al de la IEEE 80, pero cuyos resultados son coherentes con la misma. Las constantes y variables del presente caso se muestran en la Tabla 6. Adicionalmente se comenta que este procedimiento de cálculo se encuentra también presente en otros trabajos (Chih-Ju, 1998).

Tabla 6

Datos de entrada para el caso real

Datos de ingreso		Datos variables:	
L1	90 m	n1	7 unidades
L2	70 m	n2	9 unidades
ro	147 Ω-m	nr	0
lcond	1470 A	Lv	0
ts	0.2 s	bb	10.998 mm
Ta	30 °C	mat	0 (cobre recocido)
ros	2000 Ω-m	h	0.7m
SfDf	0.6	hg	0.5m
lgrp	1470	x1	1
recl	1	x2	1
conductor	16 (2 AWG)		
peso	70		

Nota: Elaboración propia

Los datos de tensiones limitantes de paso y toque son $E_{smax} = 4841.09V$ y $E_{tmax} = 1486.09V$ y los datos de tensiones de paso y malla obtenidos son de $E_s = 70.53V$ y $E_m = 199.35V$ y la resistencia de puesta a tierra es 0.855 ohm . La memoria de cálculo de donde se obtuvieron los datos del presente caso se muestra en el *Anexo B* del presente trabajo.

En todos los casos se observa que los factores x_1 y x_2 son iguales a 1 pues cada caso tiene una longitud definida, en la optimización realizada en este trabajo se examinará la opción de variar la extensión de la red, además en las Tablas se coloca el

número de varillas como una cantidad, durante el proceso de optimización este se considera como un porcentaje del número de cruces.

4.2 Validación del programa de cálculo y del algoritmo de optimización

4.2.1 Validación de la herramienta de cálculo

En esa sección se requiere validar la herramienta de cálculo realizada para calcular los parámetros de la red de puesta a tierra, es decir: Tensión de toque, tensión de malla y resistencia. La forma elegida para realizar la validación de la herramienta consiste en aplicar el programa de cálculo de redes de puesta a tierra hecho en Python sobre cada uno de los 3 casos de estudio descritos en párrafos anteriores y comparar resultados. Además, se incluye la comparación con los resultados del software comercial ETAP versión 19.0.1. El uso el software ETAP se muestra en el Anexo A.

4.2.1.1 Caso 1 Anexo B de IEEE 80

La Tabla 7 muestra los parámetros eléctricos provenientes de la referencia, los obtenidos por el software ETAP y los calculados con la herramienta programada en Python.

Tabla 7

Comparación de parámetros de la red para el Caso 1

	Referencia	ETAP	Cálculo	% Error Ref. vs Cálculo	% Error ETAP vs Cálculo
Es max (V)	2686.6	2694.9	2696.1	0.35%	0%
Es (V)	--	459.9	459.43	--	0%
Et max (V)	838.2	840.3	840.5	0.27%	0%
Em (V)	595.8	603.4	593.61	0.368%	1.62%
Rg (Ω)	2.62	2.619	2.732	4.275% ⁽¹⁾	4.31% ⁽¹⁾

Nota: Elaboración propia

En cuanto a la Tabla 7 cabe destacar que la referencia se procedió con el cálculo de la tensión de paso de la red, porque basándose en la gran diferencia entre la tensión de malla y la máxima tensión de toque, indicaba que la red se encontraba altamente sobredimensionada.

Los errores mostrados en la Tabla 7 son inferiores al 1% excepto el error calculado en las celdas identificadas con ⁽¹⁾ donde el error es mayor a 4%.

4.2.1.2. Caso 2: Tesis

Análogamente al caso anterior, la Tabla 8 muestra los parámetros eléctricos provenientes de la referencia, los obtenidos por el software ETAP y los calculados con la herramienta programada en Python.

Tabla 8

Comparación de parámetros de la red para el Caso 2

	Referencia	ETAP	Cálculo	% Error Ref. vs Cálculo	% Error ETAP vs Cálculo
Es max (V)	4230.76	4230.7	4230.76	0%	0%
Es (V)	336.51	334	341.8	1.572%	2.3%
Et max (V)	1231.7	1231.7	1231.7	0%	0%
Em (V)	406.02	419.8	413.73	1.89%	1.44%
Rg (Ω)	0.427	0.431	0.4475	4.41% ⁽¹⁾	3.83% ⁽¹⁾

Nota: Elaboración propia

De la comparación se destaca que los valores de las tensiones límites son exactamente iguales entre el cálculo y la referencia y que los demás errores son inferiores al 2%, en este caso el error con ⁽¹⁾ es también superior al 4%.

4.2.1.3. Caso 3: Caso real

Igual que en ambos casos anteriores, la Tabla 9 muestra los parámetros eléctricos provenientes de la referencia, los obtenidos por el software ETAP y los calculados con la herramienta programada en Python.

Tabla 9

Comparación de parámetros de la red para el Caso 3

	Referencia	ETAP	Cálculo	% Error Ref. vs Cálculo	% Error ETAP vs Cálculo
Es max	4841.09	4241.5	4241.53	12.4% ⁽¹⁾	0%
Es	70.53	72.7	70.144	0%	3.57%
Et max	1486.09	1323.7	1323.68	10.9% ⁽¹⁾	0%
Em	199.35	203.6	192.84	3.5% ⁽¹⁾	5.28%
Rg	0.855	0.929	0.929	8.65% ⁽¹⁾	0%

Nota: Elaboración propia

La Tabla 9 muestra mayores diferencias con respecto a la referencia, esto porque en ella se empleó un procedimiento de cálculo diferente al mostrado en la IEEE 80; sin embargo, A pesar de que los errores en las celdas indicadas con ⁽¹⁾ sean más elevados que en los casos anteriores, la red cumple con los criterios establecidos en la norma. La comparación entre los datos calculados y los obtenidos con el software ETAP presentan menores errores comparables con los casos anteriores.

Finalmente se observa que en todos los casos los errores de la resistencia de puesta a tierra son mayores a los relacionados con las tensiones, esto es por el efecto que tiene el redondeo sobre el pequeño valor que siempre toma la resistencia.

4.2.2 Validación del método de optimización

En esta sección se aplicará el método de optimización *Evolutive Simulated Annealing* o “ESA” definido en este trabajo y se realizan comparaciones con el método de recocido simulado, o “SA” por sus siglas en inglés, aplicado también a la optimización de redes de puesta a tierra por Chih-Ju *et.al* (Chih-Ju, 1998) siendo las diferencias entre ambos métodos el uso de operaciones de entrecruzamiento y mutación para encontrar soluciones vecinas y la optimización de varias soluciones simultáneas, ambas características propias del método “ESA”. Los parámetros aplicados a ambos procesos de optimización se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10

Parámetros de la optimización

	ESA	SA
Numero de iteraciones	100	100
Cantidad de soluciones simultaneas	5	5
Cantidad de vecinas	5	1
Cantidad de descendientes	50	--
Probabilidad de mutación simple	60%	--
Probabilidad de mutación doble	30%	--

Nota: Elaboración propia

Es necesario resaltar que la optimización realizada es siempre sobre el costo de implementación de la red y que los demás parámetros varían en función de ello.

Además, que en este caso se considera como variable la extensión de la red en un rango de 1 a 1.2 veces la extensión de cada caso, tanto longitudinal como transversalmente.

4.2.2.1 Caracterización estadística del desempeño:

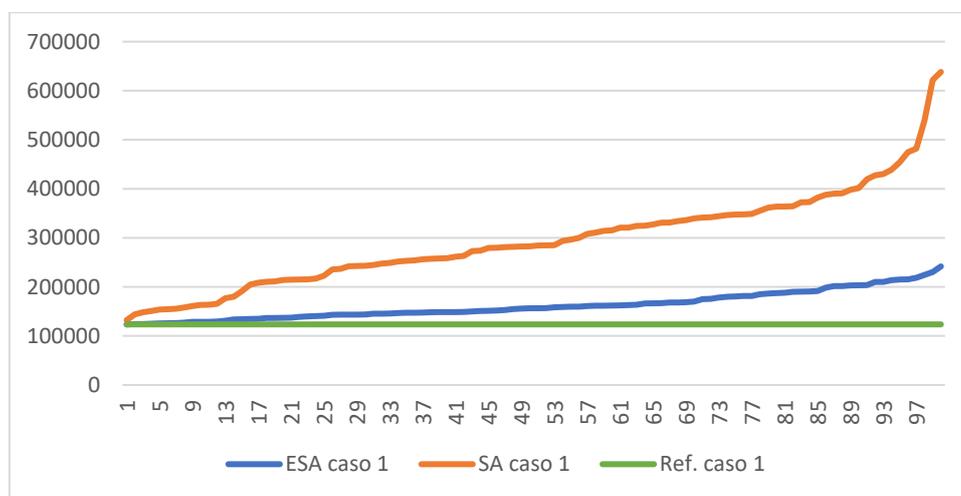
Para caracterizar estadísticamente la capacidad de ambos métodos de obtener una configuración de red de puesta a tierra de mínimo costo se ejecuta cada algoritmo de optimización, “ESA” y “SA”, 100 veces para cada uno de los 3 casos presentados.

A diferencia de lo expuesto en la sección “límites y condiciones” el valor de resistencia limite considerado en el caso 1 es la resistencia calculada de 2.732Ω pues en cálculos previos a este estudio se determinó que no es posible obtener una red de menor resistencia. Además, debido al mayor error encontrado en el cálculo de la resistencia, mostrado en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se ha considerado un margen de seguridad de 5%, por lo que los valores limites considerado en la optimización son de 2.6Ω , 0.95Ω y 0.95Ω .

Los resultados ordenados de menor a mayor se observan en la Figura 27, Figura 28 y Figura 29, junto con el costo de la referencia para cada caso.

Figura 27

Datos ordenados de optimizaciones realizadas con ESA y SA caso 1

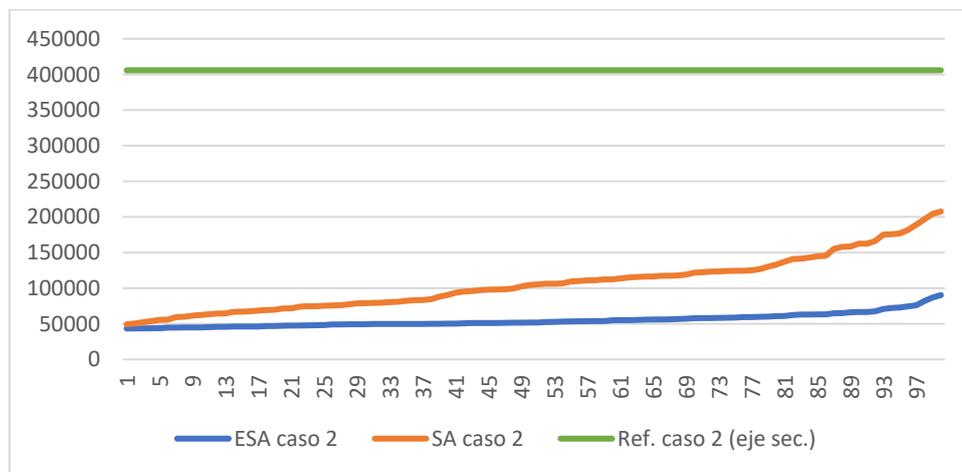


Nota: Elaboración propia

La Figura 27. muestra que en el caso 1, la mayor parte de los datos mostrados (costos de materiales) para ambos métodos de optimización son mayores que la referencia, excepto algunos de los calculados con el método ESA que consiguen optimizar. Análogamente al caso anterior, la **Figura 28** muestra los resultados para el caso 2, observándose que todos los valores calculados son menores que los de la referencia.

Figura 28

Datos ordenados de optimizaciones realizadas con ESA y SA caso 2

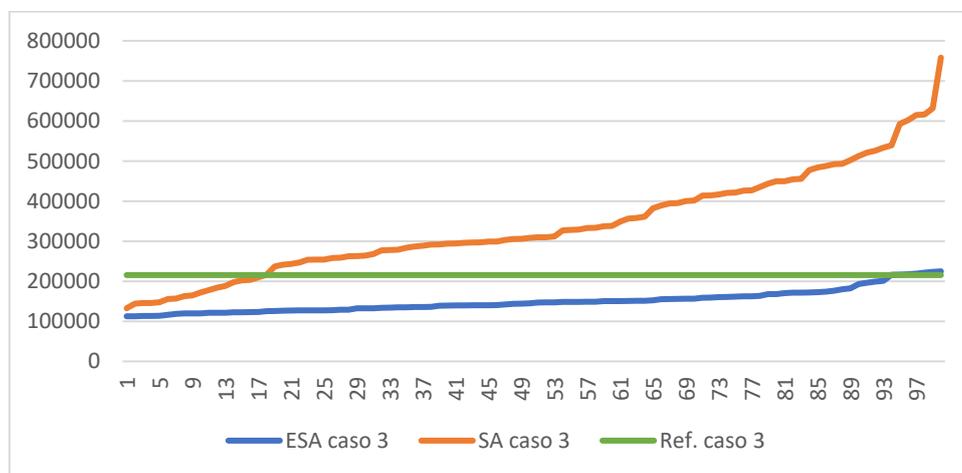


Nota: Elaboración propia

La **Figura 29**. muestra que ambos métodos consiguen valores menores que la referencia, siendo todos los calculados con el método ESA, inferiores a la referencia.

Figura 29

Datos ordenados de optimizaciones realizadas con ESA y SA caso 3



Nota: Elaboración propia

Las **Figura 27**, **Figura 28** y **Figura 29** muestran que ambos procesos son eficaces, pues en ambos casos parte de los 100 procesos de optimización realizados resultan en configuraciones de menor costo que las calculadas en los casos de estudio. Además, se observa que el algoritmo “SA” se concentra más en la exploración de todo el dominio y descuida la búsqueda local a diferencia del algoritmo “ESA” que realiza una mejor búsqueda local (Tran et al., 2021). También se muestra en una mayor coherencia entre sus valores, menor desviación. Otra ventaja del algoritmo “ESA” sobre el “SA” es que en los 3 casos se logra menores valores de costo que es el principal objetivo del presente trabajo y de la utilización de este procedimiento en la industria eléctrica. Esta mayor capacidad de reducción de costos de la “ESA” sobre la “SA” se observa también a través de las medidas de tendencia central y dispersión mostradas en la Tabla 11

Tabla 11

Datos estadísticos de desempeño de los métodos de optimización

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	ESA	SA	ESA	SA	ESA	SA
Valor mínimo	123415.3	132264.3	43336.6	49203.7	112608.0	132594.1
Valor medio	162132.7	295535.1	54779.6	106417.0	149986.0	340423.6
Valor máximo	241726.3	638303.7	90243.3	207583.7	224740.0	758050.8
Mediana	156411.5	283613.2	51669.2	104779.1	145741.9	309109.6
Des. Estándar	27996.4	98051.8	9434.8	37894.4	27877.1	128902.6

Nota: Elaboración propia

La Tabla 11 muestra valores inferiores en el uso del algoritmo “ESA” frente al “SA” en cada fila lo cual corrobora la mayor capacidad de optimización de este algoritmo. En el caso de valores mínimos, o “mejores” valores en el contexto de la minimización de costos, se tienen diferencias de 6.7%, 11.9% y 15.1% para los 3 casos respectivamente a favor del método “ESA”. Los valores de desviación estándar, medida de la dispersión entre los datos, también son menores, en 71.4%, 75.1% y 78.4% respectivamente lo cual confirma la tendencia del método “SA” a realizar una mayor exploración y la tendencia del “ESA” a realizar una exploración, pero también una búsqueda local del resultado óptimo.

Los datos numéricos usados en la presente sección para cada caso y método de optimización se encuentran en el *Anexo D*.

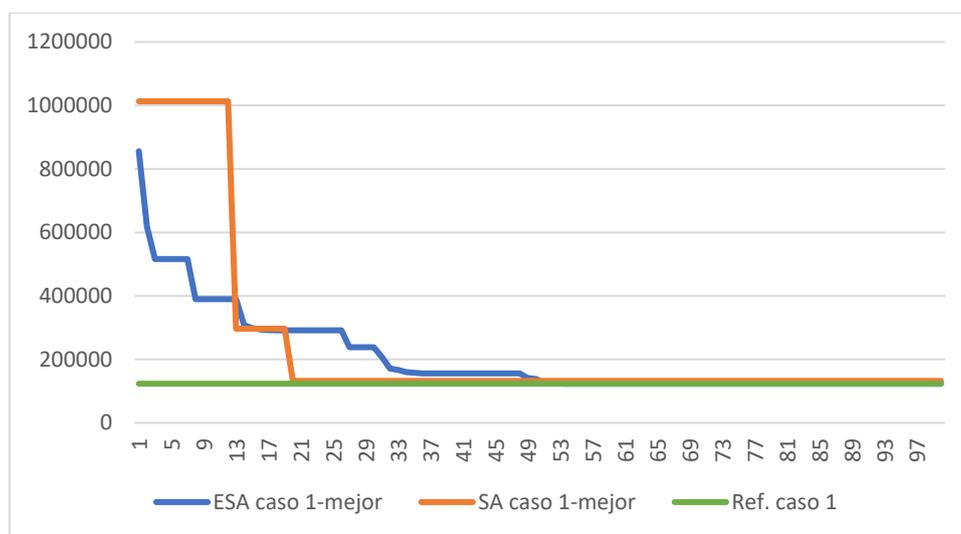
4.2.2.2 Caracterización del proceso de optimización:

Para poder caracterizar el proceso de optimización se han seleccionado los procesos con “mejor” resultado, provenientes de las 100 optimizaciones realizadas para ambos métodos en la sección anterior.

La **Figura 30** muestra los resultados obtenidos en el proceso de optimización para el caso 1 usando tanto *SA* como *ESA*.

Figura 30

Proceso de optimización para el caso 1



Nota: Elaboración propia

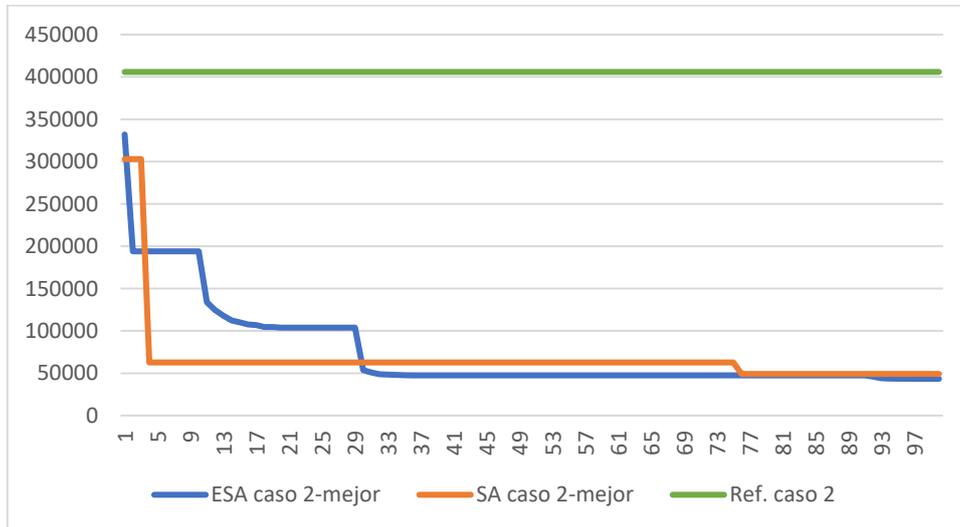
Análogamente al caso anterior La **Figura 31** muestra los resultados obtenidos en el proceso de optimización para el caso 2 usando tanto *SA* como *ESA*.

En **Figura 30**, **Figura 31** y **Figura 32** la mejora de los resultados obtenidos para cada caso y la iteración en que se alcanza el valor mínimo. Además, que el método “SA” realiza una gran exploración por todo el dominio empezando con un valor mucho mayor al óptimo e incluso al de la referencia, en cambio el método “ESA” realiza tanto una exploración como una búsqueda local lo cual le permite obtener soluciones de menor

valor. Una característica positiva de ambos métodos es que en los 3 casos obtienen valores menores a los de la referencia.

Figura 31

Proceso de optimización para el caso 2

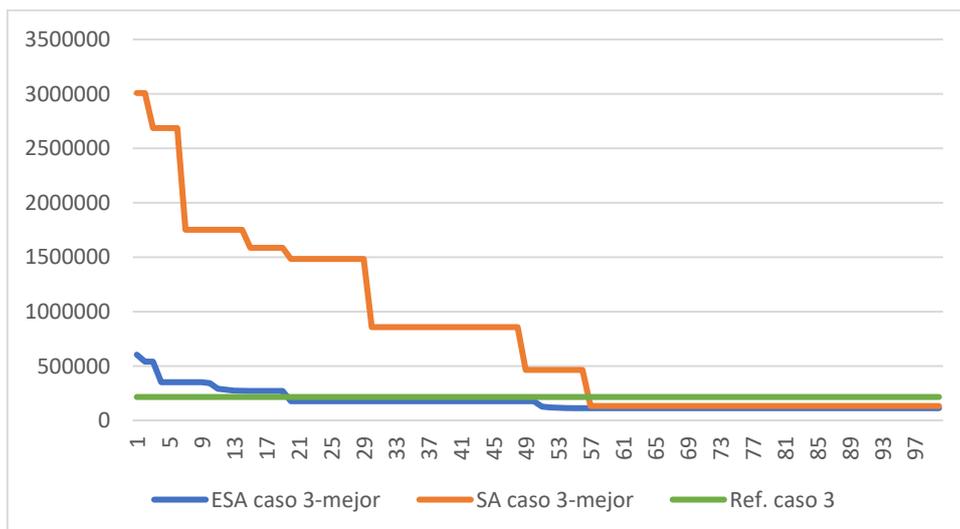


Nota: Elaboración propia

Igual que en los casos anteriores la **Figura 32** muestra los resultados obtenidos en el proceso de optimización para el caso 2 usando tanto SA como ESA.

Figura 32

Proceso de optimización para el caso 3



Nota: Elaboración propia

La Tabla 12 muestra el número de iteración donde el método llega a su valor óptimo y el mejor valor.

Tabla 12*Número de iteración donde alcanza el valor óptimo*

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	ESA	SA	ESA	SA	ESA	SA
# iteración	53	19	96	75	54	56
Mejor solución	123415.3	132264.3	43336.6	49203.7	112608.0	132594.1

Nota: Elaboración propia

Se observa en cada caso que la mejor solución obtenida por el método “ESA” tiene un menor valor que la obtenida mediante el método “SA”, lo cual es una característica positiva dentro del proceso de minimización de costos. Además, en dos de los tres casos presentados se muestra que el método “SA” llega a su valor óptimo en menos pasos, esto es síntoma de una menor capacidad de realizar una búsqueda local para mejorar los valores obtenidos (Alik et al., 2015).

4.3 Optimización de los casos presentados

Usando la herramienta desarrollada en Python para el presente trabajo se ha calculado el costo final de las redes de puesta a tierra descritas en los 3 casos de estudio presentados, aplicando los costos unitarios de la Tabla 3 estos costos finales son mostrados en la Tabla 13 junto con el menor valor obtenido en los procesos de optimización tratados en esta sección y mostrados en el *Anexo D*. Además, se muestra el porcentaje de ahorro con respecto del costo según la configuración de la referencia.

Tabla 13*Comparación de costos*

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Costo de la referencia (S/.)	123491	405888	535520
Costo optimizado (S/.)	124415.3	43336.6	112608.0
% de ahorro	0.75%	89.32%	78.97%

Nota: Elaboración propia

En el primer caso el ahorro es cercano a cero, aparentemente porque el caso mostrado en la IEEE 80 ya se encuentra optimizado. En los dos últimos casos se obtienen porcentajes de ahorro superiores al 70% en la implementación de la red. Se observa un mayor ahorro en el caso 2, esto se justifica pues la tesis de donde proviene la configuración utilizada no tiene por objetivo optimizar costos sino solo encontrar una

configuración que cumpla el procedimiento de cálculo de la IEEE 80, así como las limitaciones de tensión y resistencia de puesta a tierra. Los 3 casos se ven influenciados por la diferencia de costos unitarios considerados, incluso en el primero no se ha considerado costo alguno.

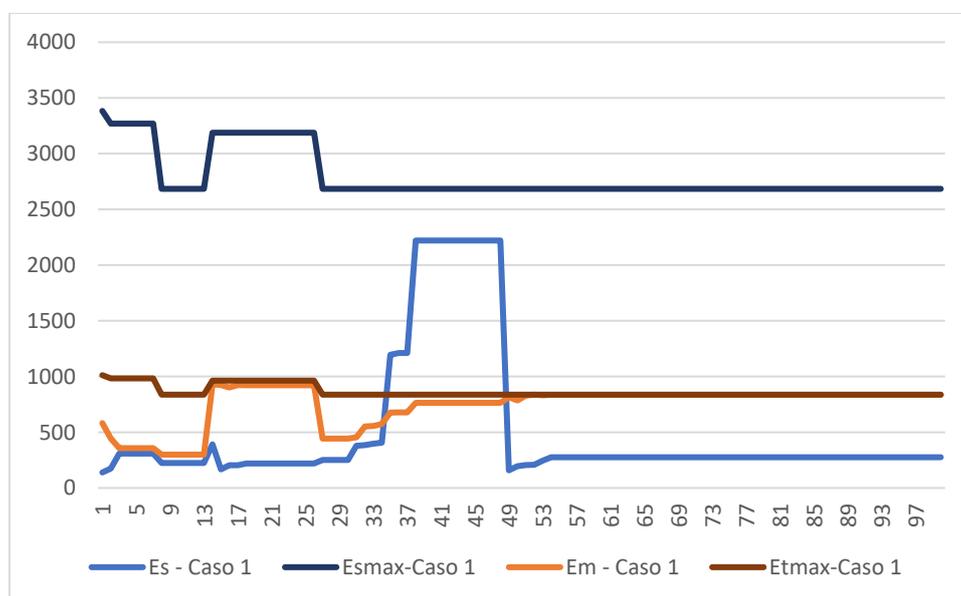
4.4 Influencia de la optimización sobre las tensiones de toque y paso.

En esta sección se describirá la influencia del algoritmo de optimización “ESA” sobre las tensiones de toque y paso máximas permisibles y las tensiones de toque y paso características de la configuración de la red en optimización para los tres casos de estudio, analizando solo los procesos anteriormente denominados como “mejores”.

En la **Figura 33** se observa que la tensión de toque resulta ser un factor limitante durante este proceso de optimización pues el valor de esta tensión llega a aproximarse a su valor límite.

Figura 33

Valores de tensiones de toque y paso para el caso 1

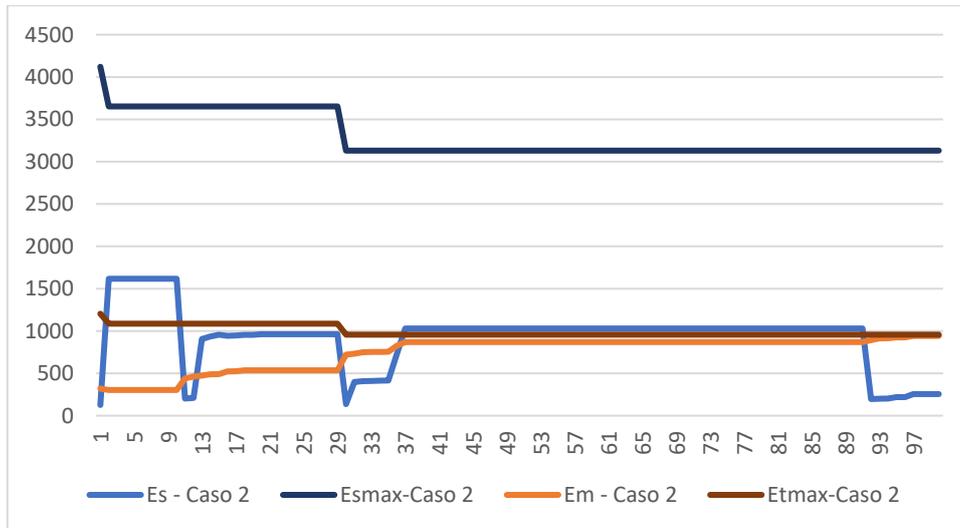


Nota: Elaboración propia

La **Figura 34** muestra a la tensión de toque como un factor limitante, igual que en el caso anterior.

Figura 34

Valores de tensiones de toque y paso para el caso 2

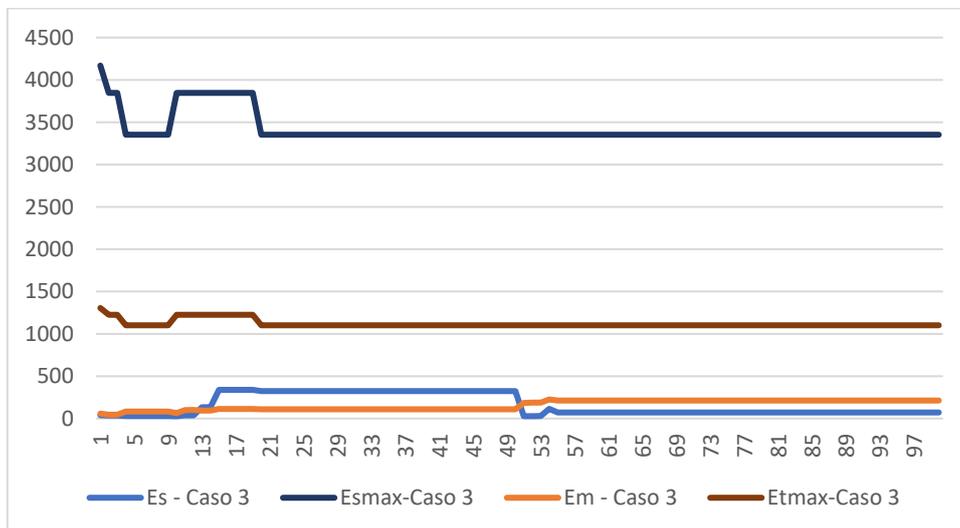


Nota: Elaboración propia

En la **Figura 35** se observa un comportamiento distinto a los anteriores, pues en este caso ninguna de las tensiones es un valor limitante.

Figura 35

Valores de tensiones de toque y paso para el caso 3



Nota: Elaboración propia

Finalmente, se observa un comportamiento común, en todos los casos se tiene una característica descendente de los valores límites de la tensión de toque y paso.

La Tabla 14 muestra los valores finales obtenidos de estas 4 tensiones frente a sus referencias para los 3 casos.

Tabla 14*Tensiones de toque y paso finales*

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Referencia	Optimizado	Referencia	Optimizado	Referencia	Optimizado
Es	459.43	275.48	4230.76	254.97	70.14	71.92
Esmax	2686.6	2684.28	2686.6	3130.68	4241.5	3352.50
Em	593.61	836.60	336.51	941.65	192.88	213.50
Etmax	2686.6	837.59	4230.76	956.67	1323.7	1101.42

Nota: Elaboración propia

Los datos usados de esta sección se encuentran en el *Anexo E*.

En cuanto al comportamiento de la tensión de toque y paso límites dependen de la configuración pues en su formulación se incluye el parámetro “hg” definido como espesor de la capa de grava superficial.

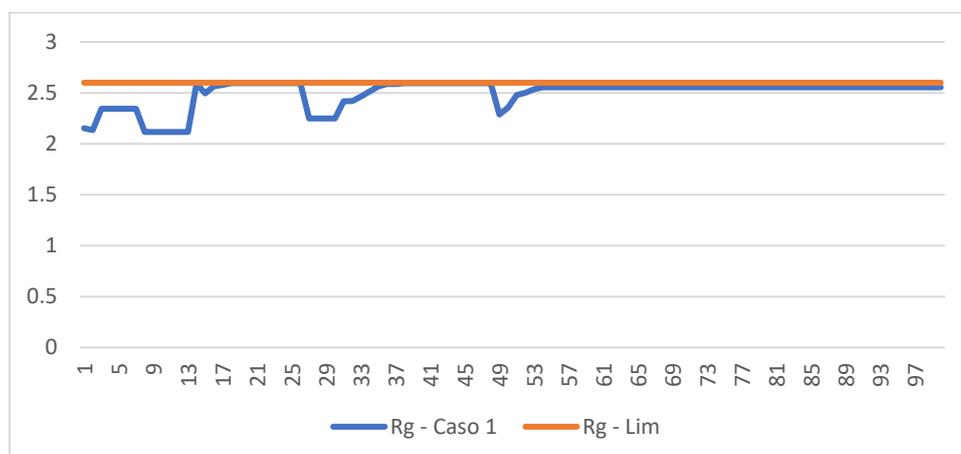
4.5 Efecto de la optimización sobre la resistencia de puesta a tierra

Las figuras **Figura 36**, Figura 37 y **Figura 38** muestran cómo cambia el valor de la resistencia de puesta a tierra durante el “mejor” proceso de optimización para cada uno de los casos de estudio, además cada grafica también muestra el valor de la resistencia de puesta a tierra límite considerada.

La **Figura 36** muestra un incremento de la resistencia llegando prácticamente a igualar al valor límite establecido durante el proceso de optimización para el caso 1.

Figura 36

Comportamiento de la resistencia de PAT en la optimización para el caso 1

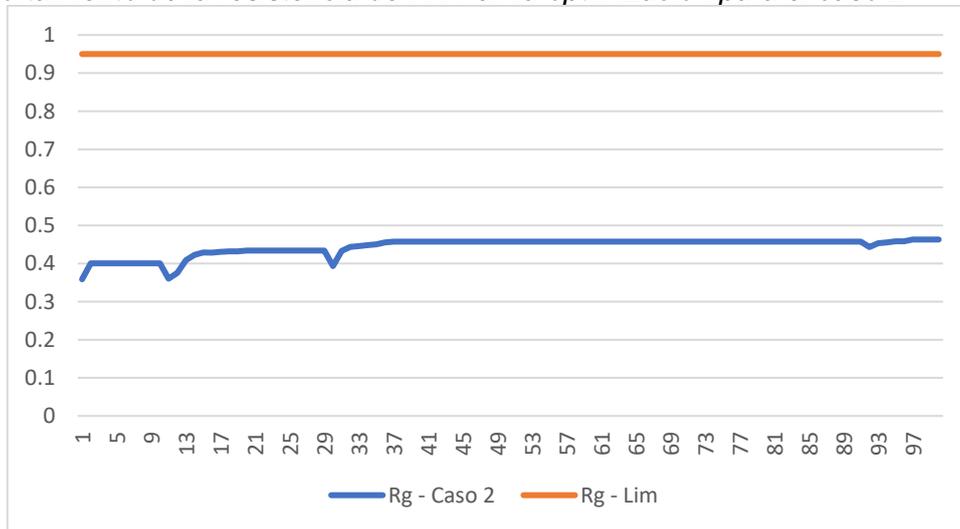


Nota: Elaboración propia

En la Figura 37 se observa un incremento de la resistencia de optimización en el caso 2, pero sin llegar a la convergencia con el valor límite establecido.

Figura 37

Comportamiento de la resistencia de PAT en la optimización para el caso 2

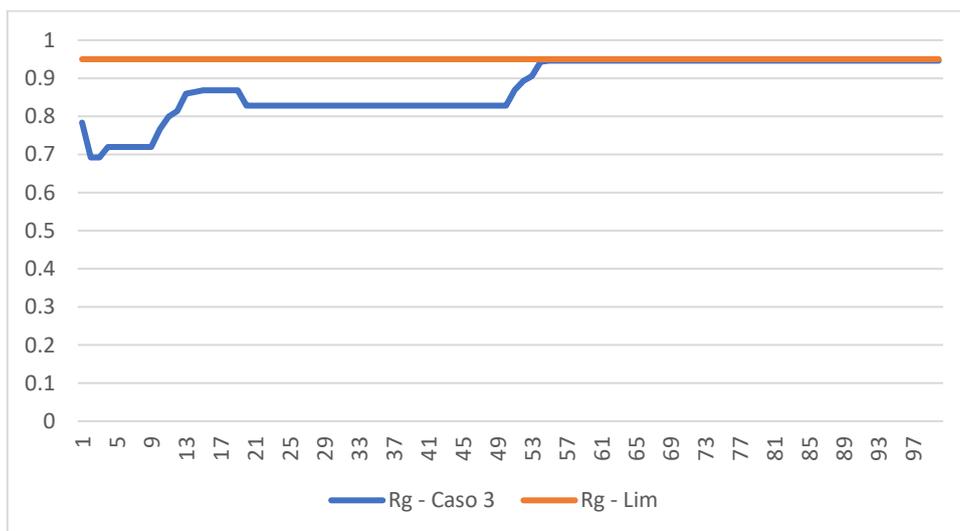


Nota: Elaboración propia

La **Figura 38** muestra un incremento de valor de la resistencia durante el proceso de optimización, llegando a igualar al valor de la resistencia límite empleada en este caso.

Figura 38

Comportamiento de la resistencia de PAT en la optimización para el caso 3



Nota: Elaboración propia

En todos los casos se observa una tendencia ascendente de la resistencia de la red de puesta a tierra durante todo el proceso de optimización. La Tabla 15 muestra los valores finales del proceso de optimización, los límites y el valor de la referencia. En el primer caso se debe considerar que consigue el valor de la resistencia usando electrodos convencionales de menos de 2.4m de longitud, en la referencia utilizaba 38 electrodos de 10m cada uno.

Tabla 15

Valores de resistencia

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
R optimizado (Ω)	2.553	0.463	0.946
R referencia (Ω)	2.62	0.427	0.929
Variación ref vs optm	-2.6%	8.4%	1.8%
R límite (Ω)	2.6	0.95	0.95

Nota: Elaboración propia

Los datos usados de esta sección se encuentran en el *Anexo E*.

4.6 Efecto de la optimización sobre la configuración de la red

La configuración de la red se encuentra definida por 10 variables, en esta sección no se estudian todas ellas, solo se prestará atención a los principales siendo éstas:

- Variación del área de la red.
- Profundidad de enterramiento.
- Longitud de conductor de la red horizontal.
- Longitud total de varilla enterrada.

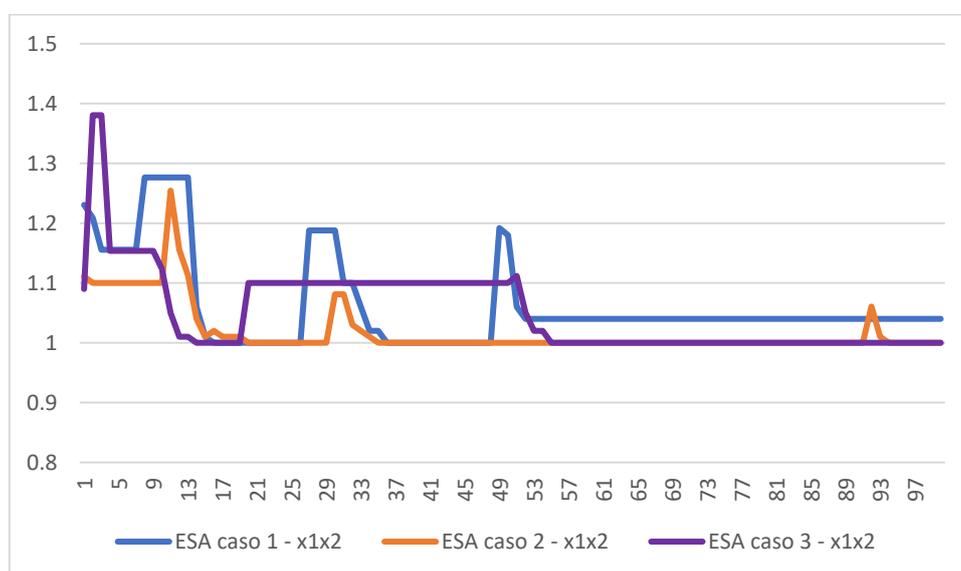
Todas ellas son parte de la fórmula de Sverak para el cálculo simplificado de la resistencia de puesta a tierra. Además, solo se muestra el análisis para el “mejor” proceso de optimización de los 3 casos. Las gráficas que muestran el comportamiento de la configuración en función al número de iteraciones se observan en la Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43

4.6.1 Comportamiento de la variación del área de la red

La **Figura 39** muestra el factor en que varía el área de la red con respecto al valor inicial, resulta de multiplicar los factores de incremento longitudinal “x1” y “x2”, los cuales pueden variar independientemente entre 1 y 1.2. Puede observarse que en los 3 caso el área tiende a reducirse al mínimo, casi la unidad, esto debido al proceso de optimización centrado en minimizar costos de materiales.

Figura 39

Comportamiento de la variación del área de la red



Nota: Elaboración propia

La Tabla 16 muestra los valores finales de esta variable en todos los casos se considera como factor de referencia igual a 1. En esta Tabla se confirma el efecto de optimización de materiales que tiene el algoritmo sobre la configuración de la red considerando que el valor máximo de $x1*x2$ es de 1.44.

Tabla 16

Valores finales del factor de variación del área de la red

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Factor $x1*x2$	1.04	1	1

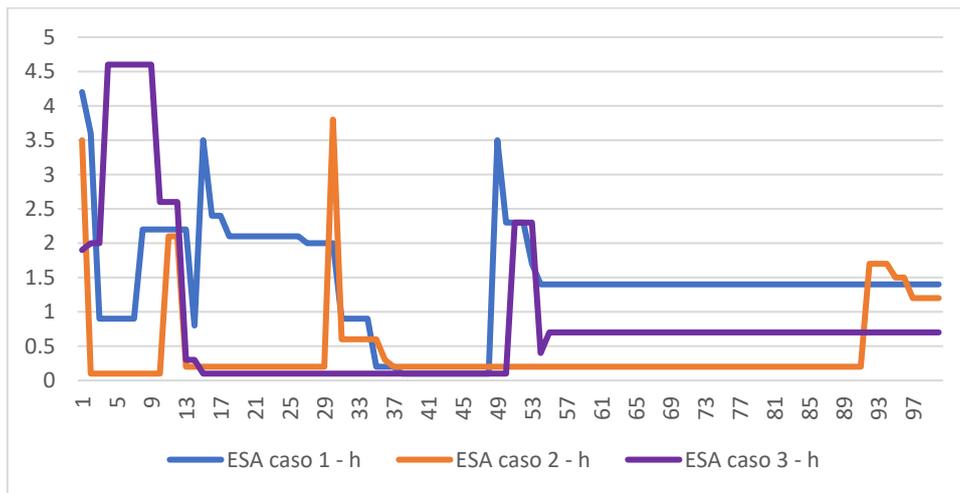
Nota: Elaboración propia

4.6.2 Comportamiento de la profundidad de enterramiento de la red

El comportamiento de la profundidad de la red mostrado en la **Figura 40** no permite distinguir algún patrón, se indica que es uno de los valores que el algoritmo varía más pues tiene influencia tanto en el valor de las tensiones de toque y paso de la red.

Figura 40

Comportamiento de la profundidad de enterramiento de la red

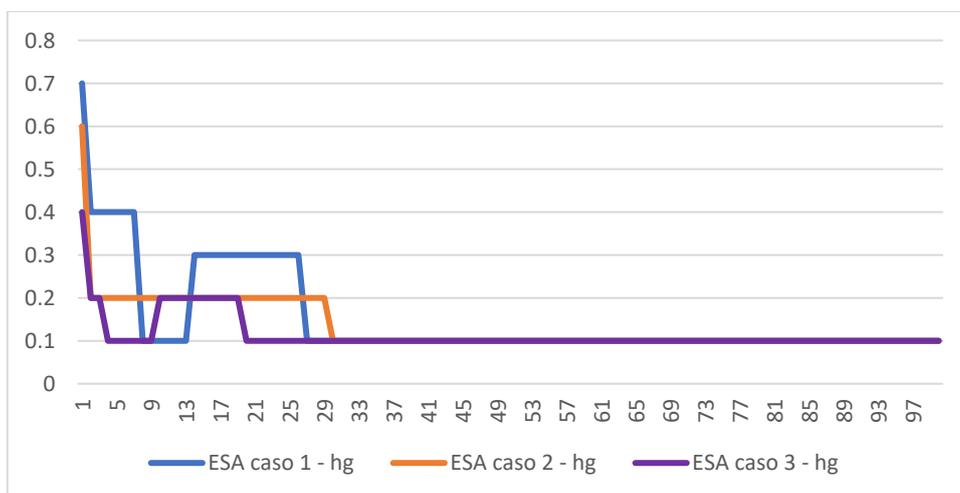


Nota: Elaboración propia

En la **Figura 41** se indica la variación del “hg” o espesor de la capa de grava el cual tiene influencia sobre las tensiones límites de toque y paso. La variación de La **Figura 41** muestra cambios iniciales hasta estabilizarse en todos los casos en 0.1m.

Figura 41

Comportamiento del espesor de la capa de grava



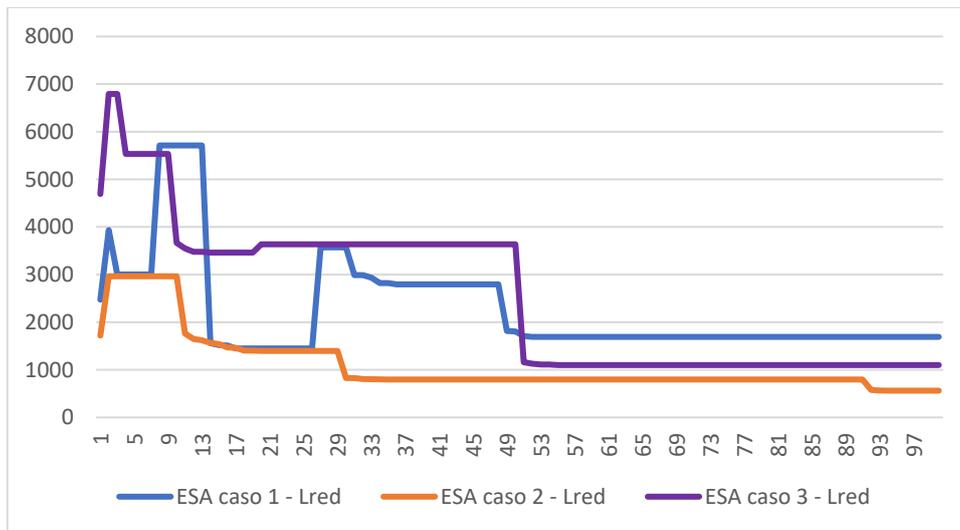
Nota: Elaboración propia

4.6.3 Comportamiento de la longitud de conductor horizontal de la red

El comportamiento de la longitud del conductor horizontal usado en la red horizontal de puesta tierra mostrado en la **Figura 42** tiene un comportamiento descendente, esto debido a la reducción de costos que lleva a cabo el algoritmo de optimización utilizado.

Figura 42

Comportamiento de la longitud de conductor horizontal de la red



Nota: Elaboración propia

Los valores de longitud de red se muestran en la Tabla 17. En el segundo y tercer caso se observa una importante disminución de la longitud de la red horizontal, en el primer caso hay un ligero aumento, pero, esto es debido a la reducción de electrodos verticales.

Tabla 17

Valores finales de longitud de la red horizontal

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Longitudes de las referencias (m)	1659	1108.5	1260
Longitudes finales (m)	1691.76	562.5	1100
% de decremento	-1.97%	49.26%	12.70%

Nota: Elaboración propia

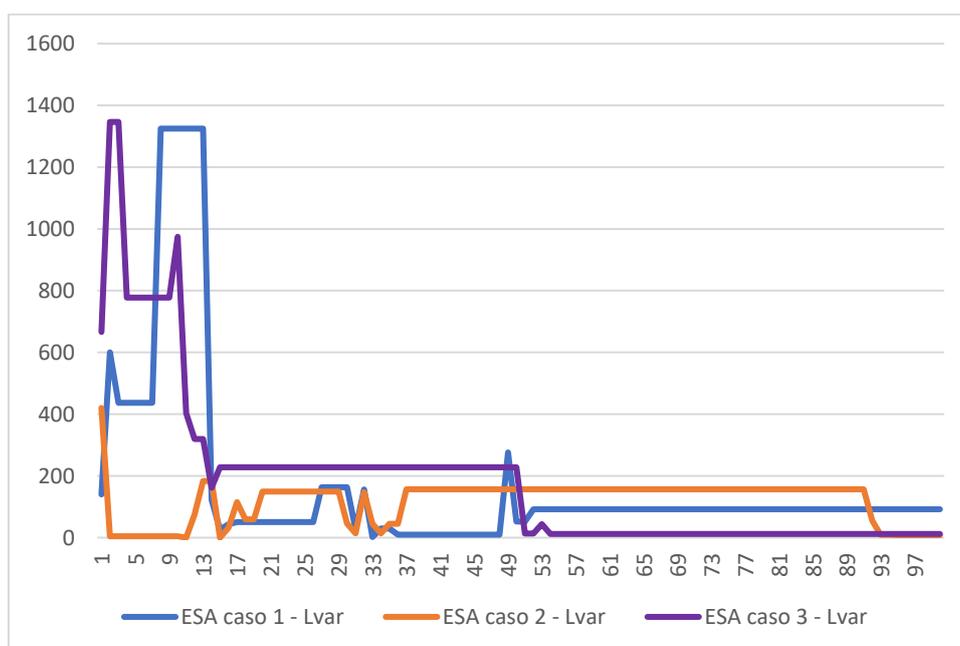
4.6.4 Comportamiento la longitud total de varillas verticales de la red

La **Figura 43** muestra que la longitud total de las varillas o electrodos verticales usados junto con la red horizontal tiene un comportamiento descendente después de

una exploración de alternativas iniciales, esto por dos motivos: La acción del algoritmo “ESA” de reducir el costo total de los electrodos verticales y el poco efecto que presentan estos electrodos sobre la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de toque y paso de la red (J. Yanque, 2012).

Figura 43

Comportamiento la longitud total de varillas verticales de la red



Nota: Elaboración propia

Los valores finales de la longitud final de electrodos se muestran en la **Tabla 18**.

Tabla 18

Valores finales de longitud total de varillas verticales

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Longitudes de las referencias (m)	380	42.5	0
Longitudes finales (m)	92	8.4	12
% de decremento	75.79%	80.24%	--

Nota: Elaboración propia

En los dos primeros casos analizados de la Tabla 18 la longitud total de los electrodos verticales resulta menor que las consideradas en las referencias, en el tercer caso se registra un aumento de 12 pues la referencia no cuenta con electrodos verticales.

Los datos usados de esta sección para estudiar la configuración de la red durante el proceso de optimización se encuentran en el *Anexo F*.

La **Tabla 19**, **Tabla 20** y **Tabla 21** muestran una comparación de las configuraciones de los casos de referencia versus sus versiones optimizadas.

En la **Tabla 19** no se muestra variación en la cantidad de conductores de la red horizontal, pero si en la longitud de las varillas, esto por el límite establecido en dominio. Aparentemente la gran longitud de las varillas verticales se ha reemplazado por una mayor profundidad de enterramiento de la red y un pequeño incremento en extensión, lo cual confirma la importancia de esta variable.

Tabla 19

Comparación de parámetros de configuración de la red del Caso 1

Caso 1			
Referencia		Caso optimizado	
n1	10 unidades	n1	10 unidades
n2	13 unidades	n2	13 unidades
nr	38 unidades	nr	40 unidades
Lv	10 m	Lv	2.3 m
bb	10 mm	bb	10 mm
mat	0	mat	0
h	0.5m	h	1.4 m
hg	0.102m	hg	0.1 m
x1	1	x1	1
x2	1	x2	1.04

Nota: Elaboración propia

En la **Tabla 20** se observa una reducción en la cantidad de conductores, el espesor de la capa de grava y en la cantidad de electrodos.

Tabla 20

Comparación de parámetros de configuración de la red del Caso 2

Caso 2			
Referencia		Caso optimizado	
n1	9 unidades	n1	5 unidades
n2	15 unidades	n2	7 unidades
nr	17 unidades	nr	4 unidades
Lv	2.5 m	Lv	2.1 m
bb	10.998 mm	bb	10 mm
mat	0	mat	0
h	0.8m	h	1.5 m
hg	1m	hg	0.1 m
x1	1	x1	1
x2	1	x2	1

Nota: Elaboración propia

En la **Tabla 21** hay una reducción en la cantidad de conductores que forman la red horizontal y es intercambiada por una gran cantidad de electrodos de corto tamaño

lo cual puede resultar impráctico en la ejecución, posiblemente se tome la segunda “mejor” configuración si permite una menor cantidad de horas hombre.

Tabla 21

Comparación de parámetros de configuración de la red del Caso 3

Caso 3			
	Referencia		Caso optimizado
n1	7 unidades	n1	6 unidades
n2	9 unidades	n2	8 unidades
nr	0	nr	40
Lv	0	Lv	0.3
bb	10.998 mm	bb	10 mm
mat	0	mat	0
h	0.7m	h	0.7 m
hg	0.5m	hg	0.1 m
x1	1	x1	1
x2	1	x2	1

Nota: Elaboración propia

Conclusiones

1. Se desarrolló una herramienta de cálculo en Python para determinar los parámetros de una red de puesta a tierra, validada con casos del estado del arte y software comercial. Los errores calculados al comparar los valores de tensiones y resistencias de puesta a tierra obtenidos son inferiores al 3% y 5% respectivamente, excepto en los casos con un proceso de cálculo diferente al estándar IEEE 80.
2. El algoritmo "ESA" optimizó la red de puesta a tierra, logrando ahorros del 0.75%, 89.32% y 78.97% en comparación con las referencias en tres casos de estudio. Además, se observó una diferencia del 6.7%, 11.9% y 15.1% en los costos en relación al algoritmo "SA".
3. El algoritmo "ESA" mostró variaciones ascendentes en la resistencia de la red durante el proceso de optimización, pero siempre por debajo de los límites establecidos.
4. El algoritmo "ESA" permitió variaciones en la profundidad de enterramiento, espesor de la capa de grava y longitud del conductor horizontal. Se observaron reducciones significativas del 75.8% y 80.24% en la longitud total de las varillas verticales de cobre en los dos primeros casos, demostrando la reducción de costos lograda por el algoritmo y el poco impacto que tienen las varillas verticales sobre los parámetros eléctricos de la red.

Recomendaciones

1. El presente trabajo abre una línea de investigación que puede continuarse mediante la optimización de redes de puesta a tierra de espaciamiento no uniformes, mayormente tienen una menor densidad de conductores en el centro. Estas redes requieren el uso de elementos finitos para su cálculo pues el procedimiento de la IEEE 80 no es válido en este caso.
2. Es recomendable que las personas que deseen profundizar o mejorar este tema de investigación tenga una base en programación, preferente en Python y manejen algún software que le permite realizar la validación de la mejora realizada, en este caso se usó ETAP versión 19.0.1, pero puede ser otro semejante.
3. En la aplicación del algoritmo se recomienda considerar márgenes en el cálculo de la resistividad del terreno pues su valor varía por condiciones climáticas y se quiere conservar los parámetros de la red dentro de sus límites durante todo el año y decrece exponencialmente con el pasar de los años.
4. Se recomienda impulsar la aplicación de métodos metaheurísticos o de búsqueda computacional, usados normalmente en la optimización de sistemas eléctricos de potencia, en las diferentes áreas del estudio de la ingeniería eléctrica con fines de optimización de costos, incremento de seguridad, minimización de horas de trabajo, etc.

Referencias bibliográficas

- Alik, B., Tegar, M., & Mekhaldi, A. (2015). Minimization of Grounding System Cost Using PSO, GAO, and HPSGAO Techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(6), 2561–2569. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2445979>
- ASTM G57-20 - Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, (2020).
- Brown, K., Shokooh, F., Abcede, H., & Donner, G. (1990). Interactive simulation of power systems: ETAP applications and techniques. *Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1930–1941 vol.2. <https://doi.org/10.1109/IAS.1990.152451>
- Casas Ospina, F. (2008). *Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica*.
- Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), 41–51. <https://doi.org/10.1007/BF00940812>
- Chih-Ju, C. (1998). Optimal Design of Large Grounding Grids Based on Simulated Annealing Method. *Chung Yuan Journal*, 26(3), 77–85.
- Chou, 周至如(Chih-Ju. (1998). Optimal Design of Large Grounding Grids Based on Simulated Annealing Method. *中原學報*, 26(3), 77–85. <https://doi.org/10.6358/JCYU.199808.0077>
- de Araújo, R. (2019). *Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica usando Otimização por Enxame de Partículas Aprimorado*. Unmiversidade Federal da Paraíba.
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2016). *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer Berlin, Heidelberg.

- El-Refaie, E.-S. M., Elrahman, M. K. A., Mohamed, M. Kh., & Tawfic, A. E. S. (2018). Optimal Arrangement for the Grounding Grid Conductors by Using PSO. *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 862–867. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635147>
- González Duque, R. (2015). *Python para todos*.
- IEEE 81 - Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, (2012).
- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. (2015). *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, 1–226. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>
- Kercel, S. W. (1981). Design of Switchyard Grounding Systems Using Multiple Grids. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100(3)*, 1341–1350. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316607>
- Kindermann, G., & Campagnolo, J. M. (2010). *Aterramiento Eléctrico* (Geraldo Kindermann). Lab PLa.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, *220*(4598), 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Lozano Campos, R. D. (2020). *OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA, UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS EN LA SET CONSTITUCIÓN*”. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.
- Maita Cipriano, B. A. (2018). *Malla a tierra en un área arenosa y protección S.E. H1 del proyecto Renovandes Chanchamayo*. Universidad Continental.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The*

Journal of Chemical Physics, 21(6), 1087–1092.
<https://doi.org/10.1063/1.1699114>

Payshetti, C. S., Jadhav, H. T., & Kulkarani, S. (2017). Analysis of grounding grid of substation. *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074259>

Ramirez Mejia, C. F. (1991). *Subestaciones de alta y extra alta tension villegas* (2da edición). HMV editores.

Sengar, K. P., & Chandrasekaran, K. (2020). Effects of cost optimised grid configuration on earthing system performance: a comparative assessment. *IET Science, Measurement & Technology*, 14(5), 610–620.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0192>

Song, C., Hou, Y., & Du, J. (2018). The Optimization Algorithm for the Auxiliary Anode System of Grounding Grid Based on Simulated Annealing. *2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, 282–285. <https://doi.org/10.1109/IS3C.2018.00078>

Tran, V.-P., Phan, G. T. T., Hoang, V.-K., Ha, P. N. V., Yamamoto, A., & Tran, H.-N. (2021). Evolutionary simulated annealing for fuel loading optimization of VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 151, 107938.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107938>

Wang, Z., & Sobey, A. (2020). A comparative review between Genetic Algorithm use in composite optimisation and the state-of-the-art in evolutionary computation. *Composite Structures*, 233, 111739.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111739>

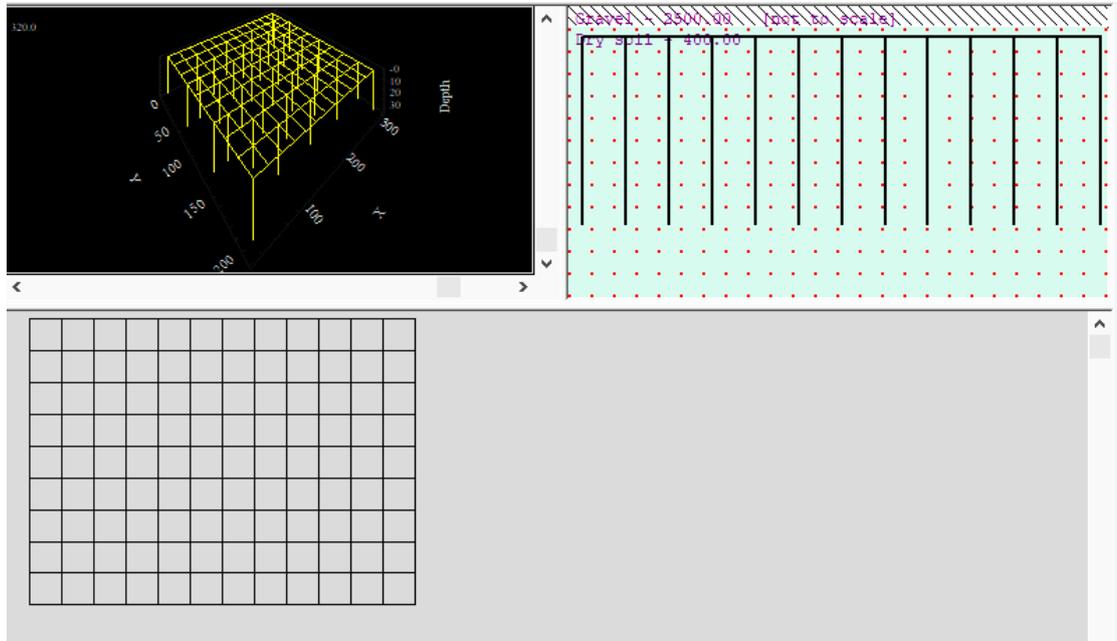
- Yan, L., & Kongyu, Y. (2008). Immunity Genetic Algorithm Based on Elitist Strategy and its Application to the TSP Problem. *2008 International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops*, 3–6. <https://doi.org/10.1109/IITA.Workshops.2008.20>
- Yang, Y., & Solomin, E. (2021). Hill-Climbing Algorithm for the Wind Turbine Yaw System. *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 561–565. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559498>
- Yanque, J. (2012). Apuntes Del Curso De: Alta Tensión y Técnicas de Pruebas de Laboratorio. Capítulo II. In *UNI-FIEE*.
- Yanque, M. (2006). *Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Anexos

Anexo 1: Cálculos de parámetros eléctricos para los casos de estudio usando ETAP.....	1
Anexo 2: Memoria de cálculo caso de estudio 3 “Caso real”	10
Anexo 3: Resultados de las optimizaciones realizadas con métodos “ESA” y “SA”	14
Anexo 4: Resultados de los “mejores” procesos de optimización con método “ESA”	17
Anexo 5: Parámetros eléctricos para los “mejores” casos obtenidos mediante “ESA”	20
Anexo 6: Parámetros de configuración para los “mejores” casos obtenidos por “ESA”	29

Anexo 1: Cálculos de parámetros eléctricos para los casos de estudio usando ETAP

Caso 1: Ejemplo 3 IEEE 81



Pantalla general

Soil Editor

Info | Analysis

	Resistivity ohm-m	Material	Depth ft
Surface Material	2500	Gravel	0.334

User-Defined Calculated

Top Layer	400	Dry soil	50
Lower Layer	400	Dry soil	

Help OK Cancel

Editor de suelo y capa superficial de grava

IEEE Group Editor



IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Grid Size

Lx ft

Ly ft

of Conductors

X Direction

Y Direction

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Conductors

Depth ft

Size AWG/kcmil

Type

Cost \$/ft

Help OK Cancel

Editor de la red horizontal de puesta a tierra

IEEE Group Editor



IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Rods

of Rods

Diameter inch

Length ft

Arrangement

Type

Cost \$/Rod

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Help OK Cancel

Editor de electrodos verticales de puesta a tierra

GRD Study Case Editor

Study Case

Study Case ID:

Options: Weight 50 kg 70 kg
 Ambient Temperature: °C

Method: Finite Element IEEE 80 - 2000/2013 IEEE 80 - 1986 IEEE 665 - 1995

Reports & Plots: Auto Display Summary & Alert Report Details

Update: # of Conductors and Rods (Optimization)

Fault Durations: tf Sec tc Sec ts Sec

Ground Short-Circuit Current: User Specified ifg kA X/R Short-Circuit Study

Grid Current Factors: Sf % Cp %

Remarks 2nd line:

< GRD1 > Help OK Cancel

Editor de caso de estudio

GRD Analysis Alert View for GRD1

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	<input type="text" value="603.4"/>	<input type="text" value="840.3"/>
Step	<input type="text" value="459.9"/>	<input type="text" value="2694.9"/>

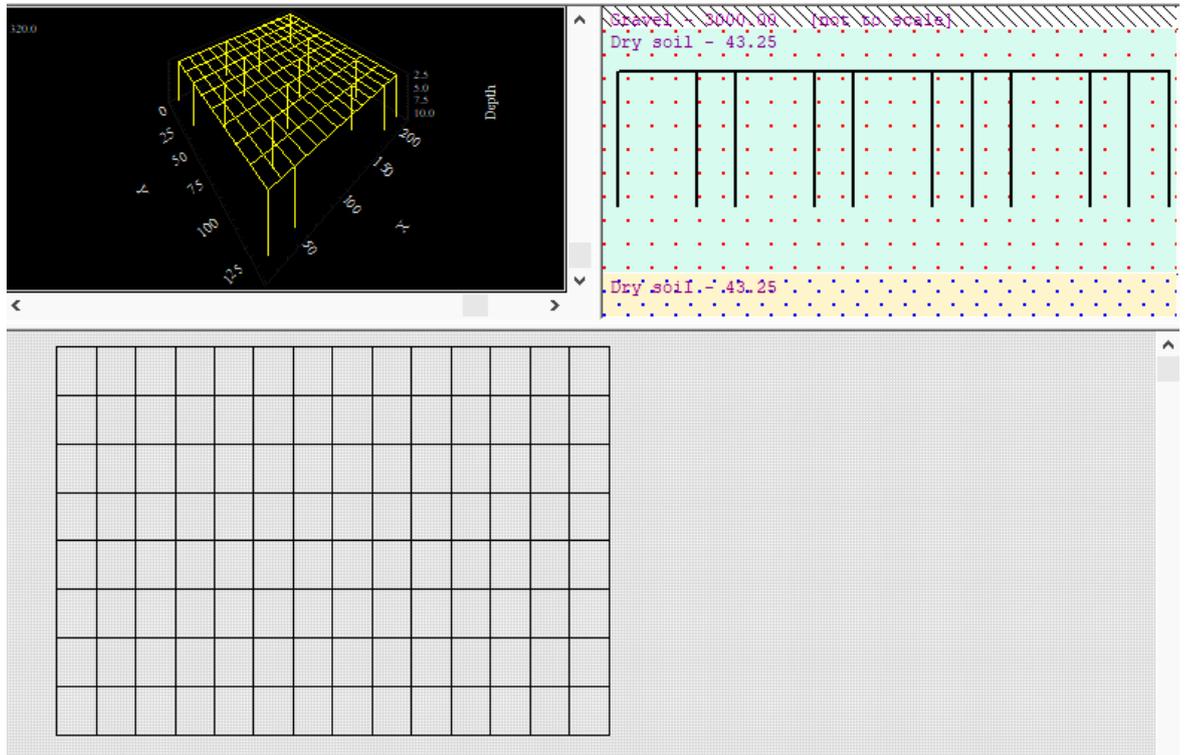
GPR Volts Rg Ohm

Alarm & Warnings

Close Help

Parámetros eléctricos de la red en la configuración del caso

Caso 2: Tesis



Pantalla general

Soil Editor

Info | Analysis

	Resistivity ohm-m	Material	Depth ft
Surface Material	3000	Gravel	3.28

User-Defined Calculated

Top Layer	43.25	Dry soil	15
Lower Layer	43.25	Dry soil	

Help OK Cancel

Editor de suelo y capa superficial de grava

IEEE Group Editor ×

Conductors | Rods

Grid Size

Lx ft

Ly ft

of Conductors

X Direction

Y Direction

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Conductors

Depth ft

Size AWG/kcmil

Type

Cost \$/ft

Help OK Cancel

Editor de la red horizontal de puesta a tierra

IEEE Group Editor ×

Conductors | Rods

Rods

of Rods

Diameter inch

Length ft

Arrangement

Type

Cost \$/Rod

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Help OK Cancel

Editor de electrodos verticales de puesta a tierra

GRD Study Case Editor

Study Case |

Study Case ID:

Options

Weight: 50 kg 70 kg

Ambient Temperature: °C

Method

Finite Element

IEEE 80 - 2000/2013

IEEE 80 - 1986

IEEE 665 - 1995

Reports & Plots

Auto Display Summary & Alert

Report Details

Update

of Conductors and Rods (Optimization)

Fault Durations

tf: Sec tc: Sec ts: Sec

Ground Short-Circuit Current

User Specified Ifg: kA X/R:

Short-Circuit Study

Grid Current Factors

Sf: %

Cp: %

Remarks 2nd line

< GRD1 > Help OK Cancel

Editor de caso de estudio

GRD Analysis Alert View for GRD1

Summary and Alert |

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	<input type="text" value="419.8"/>	<input type="text" value="1231.7"/>
Step	<input type="text" value="334"/>	<input type="text" value="4230.7"/>

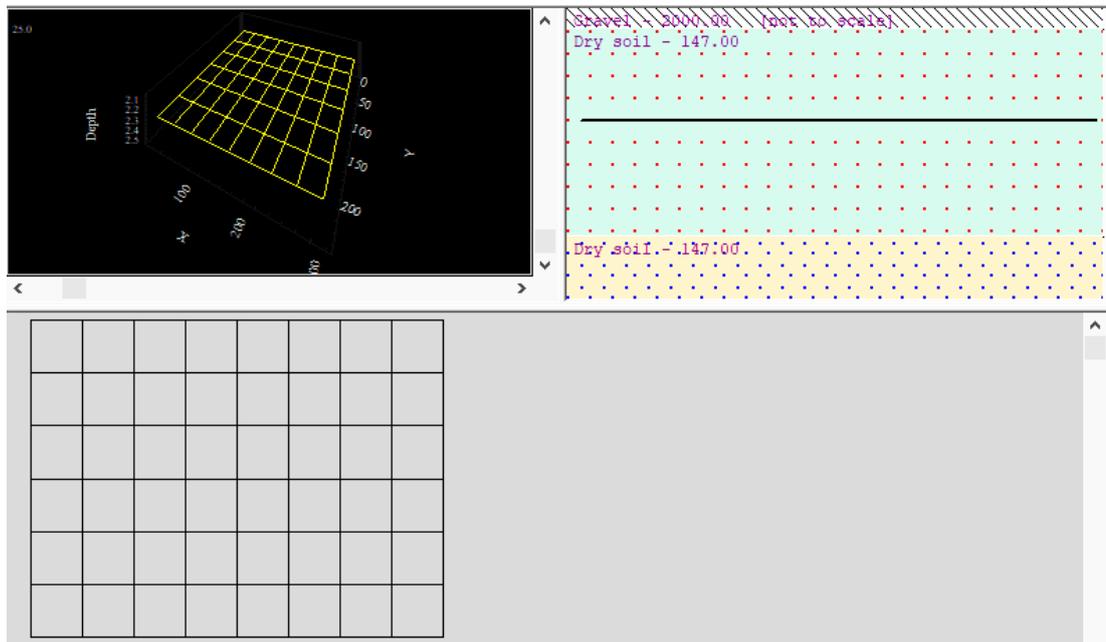
GPR: Volts Rg: Ohm

Alarm & Warnings

Close Help

Parámetros eléctricos de la red en la configuración del caso

Caso 3: Caso Real



Pantalla general

Soil Editor

Info | Analysis

	Resistivity ohm-m	Material	Depth ft
Surface Material	2000	Gravel	1.64

User-Defined Calculated

Top Layer	147	Dry soil	5
Lower Layer	147	Dry soil	

Help OK Cancel

Editor de suelo y capa superficial de grava

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Grid Size

Lx ft

Ly ft

of Conductors

X Direction

Y Direction

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Conductors

Depth ft

Size AWG/kcmil

Type

Cost \$/ft

Help OK Cancel

Editor de la red horizontal de puesta a tierra

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Rods

Arrangement

Material Constants

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Help OK Cancel

Editor de electrodos verticales de puesta a tierra

GRD Study Case Editor

Study Case

Study Case ID:

Options

Weight: 50 kg 70 kg

Ambient Temperature: °C

Method

Finite Element IEEE 80 - 2000/2013 IEEE 80 - 1986 IEEE 665 - 1995

Reports & Plots

Auto Display Summary & Alert Report Details

Update

of Conductors and Rods (Optimization)

Fault Durations

tf: Sec tc: Sec ts: Sec

Ground Short-Circuit Current

User Specified ifg: kA X/R: Short-Circuit Study

Grid Current Factors

Sf: % Cp: %

Remarks 2nd line

< GRD1 > Help OK Cancel

Editor de caso de estudio

GRD Analysis Alert View for GRD1

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	<input type="text" value="203.6"/>	<input type="text" value="1323.7"/>
Step	<input type="text" value="72.7"/>	<input type="text" value="4241.5"/>

GPR: Volts Rg: Ohm

Alarm & Warnings

Close Help

Parámetros eléctricos de la red en la configuración del caso

MEMORIA DEL CÁLCULO DE MALLA A TIERRA

1. OBJETO

El objeto de la presente memoria de cálculo, es dimensionar y verificar el sistema de malla a tierra (PAT) en la planta Agropecuaria [REDACTED].

2. NORMAS

Para este cálculo se han seguido los lineamientos de las siguientes normas:

- VDE 0141: Earthing Systems in A. C.
- ANSI / IEEE STD. 80-1986: IEEE Guide for safety in A.C. Substation Grounding.
- Especificación N° 75 de Agua y Energía Eléctrica

3. PREMISAS ADOPTADAS

- Como sistema de protección se adoptará una malla de conductores de cobre desnudo.
- Para el cálculo de la malla mencionada en a, se adoptó una corriente de cortocircuito a tierra de 1.47kA
- De acuerdo al tipo de suelo predominante en la zona, arcillas compactas y arena arcillosa se adoptó un valor de resistividad del suelo de 347.54 Ω/ m .
- Todos los equipos de la nueva planta se deberán conectar rígidamente a la malla.

4. DESCRIPCIÓN DEL METODO DE CÁLCULO

Solicitaciones térmicas del conductor

$$Ac = I \left[\frac{33t}{\log \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)} \right]^{1/2}$$

En donde:

- $I (KA)$: Corriente máxima de falla

- t : Duración del cortocircuito
- T_m : Temperatura final del conductor (se adopta $T_m = 250$ °C)
- T_a : Temperatura ambiente (se adopta $T_a = 30$ °C)

Tensión de Paso

$$E_p = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Dónde:

- E_p : Tensión de paso permisible en voltios.
- ρ_s ($\Omega\text{-m}$) : Resistividad de la superficie del terreno.
- t (s) : Duración máxima de falla en segundos.

Tensión de Contacto

$$E_t = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

- E_t : Tensión de contacto permisible en voltios.

Tensiones reales de paso y contacto

$$E_p = k_s k_i \frac{\rho I}{L}$$

Dónde:

- E_p : Tensión de paso real en voltios.
- k_s : Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia combinada de la profundidad y el espaciamiento de la malla.
- k_i : Coeficiente de irregularidad del terreno.
- ρ ($\Omega\text{-m}$) : Resistividad del terreno.
- I (A) : Corriente máxima de falla
- L (m) : Longitud total del conductor.

La tensión de contacto real está dada por:

$$E_t = k_m k_i \frac{\rho I}{L}$$

Dónde:

- E_t : Tensión de paso real en voltios.
- k_m : Coeficiente que tiene en cuenta, las características geométricas de la malla.

Cálculo de la resistencia de la malla.

$$R = 0.443\rho \left(\frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L} \right)$$

Dónde:

- R : Resistencia en Ω s
- $A\gamma$: Área de la malla de puesta a tierra en m^2 .
- ρ (Ω - m) : Resistividad del terreno.
- L (m) : Longitud total del conductor.

5. DESARROLLO DEL CÁLCULO

Selección del conductor

Sea

- $T_a=30^\circ\text{C}$
- $T_m=250^\circ\text{C}$

$$A_c = 1470 \cdot \left[\frac{33 \cdot 0.2}{\log\left(\frac{250-30}{234+30}\right)+1} \right]^{1/2} \text{ CM}$$

$$A_c=13547 \text{ CM} \leftrightarrow 6.787 \text{ mm}^2$$

El calibre mínimo permitido por la norma se elige el conductor AWG 2/0 que tiene un diámetro igual a 10.52 mm.

Elección de la malla

$A=80$	$d=0.01052$
$B=30$	$L=1410$
$n=15$	$I_{cc}=1470$
$m=7$	$\rho=347.54$
$D=7$	$\rho_s=2000$
$h=0.7$	$A=2400$

Hallando los coeficientes,

- $K_m=0.767$
- $K_i=1.51$

- $K_s=0.306$

Cálculo de las tensiones permisibles de paso y contacto.

$$E_p = \frac{165 + 2000}{\sqrt{0.2}} = 4841.09V$$

$$E_t = \frac{165 + 0.25 \cdot 2000}{\sqrt{0.2}} = 1486.09V$$

Los valores reales son:

$$E_p = 0.306 \cdot 1.51 \cdot \frac{147.54 \cdot 1470}{1260} = 70.53V$$

$$E_t = 0.767 \cdot 1.51 \cdot \frac{147.54 \cdot 1470}{1260} = 199.35V$$

Entonces:

$$R = 0.433 \cdot 147.54 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{6300}} + \frac{1}{1260} \right)$$

$$R = 0.855\Omega$$

6. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos en los diferentes cálculos, satisfacen los rangos permitidos para este tipo de mallas de puesta a tierra.

**Anexo 3: Resultados de las optimizaciones realizadas con métodos
“ESA” y “SA”**

Iter	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	“ESA”	“SA”	“ESA”	“SA”	“ESA”	“SA”
1	123415.269	132264.348	43336.6	49203.6992	112608	132594.081
2	124107.042	144134.194	43396.15	50348.32	112722	144279.919
3	124110.427	148305.641	43455.7	52177.2301	113319.78	145517.851
4	124717.331	150993.733	43596.92	53687.4628	113320.98	145752.312
5	125423.849	153942.445	43598.875	55445.023	113900	147580.744
6	125814.449	154587.134	44618.8	55705.5797	116262	155442.919
7	126270.919	155546.606	44618.8	59431.28	118734	156786.17
8	127155.874	158176.978	44757.2	59870.2336	119741	163010.583
9	128634.339	160875.422	44757.2	61387.2064	119912	164621.388
10	128642.841	163409.381	44757.2	62376.7435	119912	171969.816
11	128699.235	163573.258	45137.332	63479.54	121282.2	177769.389
12	129409.627	165401.001	45656.5258	64189.5118	121291.4	183779.379
13	130927.621	177028.518	45678.3613	64520.5516	121291.4	188493.9
14	133481.366	179861.538	46048.574	66824.488	122500.26	198062.828
15	134044.872	191311.279	46075.3906	66941.6848	122557	202329.62
16	134761.495	204467.279	46200.308	67356.2605	122931	203543.1
17	134875.654	208449.343	46200.308	68615.3056	123305	210003.176
18	136404.788	210607.068	46837.68	69264.6213	125500.64	216122.525
19	136454.751	211260.227	46917.4955	69625.8836	125952.72	236794.034
20	136924.457	214130.121	47306.5	71524.0304	126420.83	241333.16
21	137262.919	214596.79	47391	71680.4762	127022	243213.068
22	138874.382	215036.574	47391	74010.029	127229.62	246679.546
23	139964.465	215381.648	47684.2	74495.9948	127234	253817.028
24	140521.789	217066.052	47854.615	74534.4284	127380	253905.86
25	141021.826	222661.533	48254.784	75368.3	127380	254206.832
26	143081.894	235374.2	48951.6208	75831.712	127590	257866.602
27	143335.994	236707.882	48953.5628	76013.3344	128909	259009.414
28	143358.111	241969.81	49176.529	77194.8858	129047.852	262234.724
29	143376.52	242781.323	49311.9762	78631.9525	132394.801	262606.284
30	143777.798	243009.137	49350.6	78799.7164	132445	263865.43
31	145374.989	244664.563	49636.15	79377.196	132680	268030.224
32	145486.64	247542.888	49636.15	79447.6681	133853.919	277115.566
33	145725.589	249016.996	49730.3	80329.8512	134094	277862.685
34	146612.411	251700.894	49730.3	80767.43	134979.492	278811.982
35	147244.119	253099.376	49730.3	82284.3336	134981.88	283609.416
36	147299.651	254106.169	49730.3	83115.0434	135669.5	286578

37	147765.406	256475.917	49824.45	83437.114	135678.703	288743.808
38	148218.205	257259.901	49857.61	84559.1434	136221	291590.238
39	148500.156	258053.865	50014.1915	87996.8668	138836.38	291922.44
40	148568.716	258651.524	50108.963	90389.0848	139140.875	293947.646
41	148753.455	261559.764	50201.05	93668.1976	139759	294469.815
42	148785.124	263337.976	50702.9044	95250.737	139759	295812.24
43	150072.675	273030.077	51009.8486	95885.8382	139991.729	296807.99
44	150807.011	273870.743	51059.898	97300.0364	140028	297027.928
45	151084.211	279427.571	51065.3102	97968.4375	140237	299062.844
46	151909.046	279711.348	51160.376	98149.2796	140415.78	299228.666
47	152866.292	281094.973	51260.854	98437.5816	142126	303029.304
48	154919.26	281889.767	51526.3575	99401.3162	143726.9	305375.344
49	155690.624	282448.527	51567.774	102398.282	144015	305872.664
50	156265.522	282789.795	51644.2732	104362.652	144689.7	308348.151
51	156557.422	284436.527	51694.0768	105195.6	146794	309871.106
52	156603.343	284560.924	52515.197	106124.618	147175.179	309975.558
53	158462.884	284966.262	52583.898	106246.331	147429.872	311986.28
54	158965.929	293785.727	53072.0432	106649.194	148299.6	327038.528
55	159700.53	296247.474	53371.45	109370.07	148309.76	328065.089
56	159759.654	300085.929	53480.9	110020.44	148625.57	328742.06
57	161060.661	307990.557	53480.9	110893.151	148916.782	332772.292
58	161639.102	310550.888	53749.23	111099.529	148965.872	333316.774
59	161666.335	314162.571	53749.6045	112292.618	150507.86	337232.8
60	161975.035	315317.973	54798.025	112298.839	150520	338199.132
61	162363.277	320740.275	55015.45	113605.741	150633.9	349044.608
62	162774.809	320743.825	55015.45	114896.288	150802.774	356470.876
63	163586.999	324429.739	55316.462	115660.954	151426	358096.579
64	166030.315	324851.176	55876.932	116220.179	151450	361187.688
65	166424.473	327199.073	56049.944	116323.302	152626.44	382430.134
66	166706.191	330791.839	56093.5895	117307.94	155109.76	389224.233
67	168205.446	331208.035	56301.1	117368.365	155691.51	394402.176
68	168295.076	334285.668	56735.1792	117785.246	155974	395063.598
69	168910.912	335981.592	57117.3448	118952.894	156535.99	400099.09
70	170219.323	339643.744	57820.09	121599.777	156538.34	401340.234
71	174912.656	341161.679	57934.032	122291.565	158691.385	413709.84
72	175696.172	341876.213	58081.487	123142.261	159399.693	414304.37
73	178318.638	344318.033	58188.2	123362.899	160472	416424.672
74	179853.574	346583.935	58443.2938	124073.637	160714.541	420421.252
75	180646.679	347354.667	58677.5558	124283.8	161446.285	421509.912
76	181513.091	347815.266	59470.75	124426.056	162454	426005.782
77	181608.367	348784.754	59470.75	125082.622	162490.229	426741.28
78	184957.824	355399.781	59732.5704	126726.098	163788	435329.24
79	186522.076	361580.313	60102.7546	130246.963	168177	443674

80	187234.754	363858.176	60761.5914	133012.146	168177	449553.738
81	187969.18	363865.042	60866.798	137069.484	170371.899	449820.796
82	189840.172	364245.036	62259.0672	140860.12	171384	454240.521
83	190230.955	372675.475	62880.4	141321.388	171758	455624.34
84	190493.007	372755.59	62880.4	142935.779	171982	477435.352
85	191525.486	382036.095	63066.7102	144729.911	172905.594	483871.652
86	198542.44	387717.214	63143.1872	145460.902	173873	487381.232
87	201697.743	390223.009	64637.5216	155215.419	176481.48	492130.208
88	201745.704	390621.314	65011.6132	157993.522	180098.66	493149.816
89	202957.502	398081.592	66104.9874	158434.637	182327.51	502138.902
90	203135.501	401449.435	66442.6326	162428.298	193215.962	512668.72
91	203530.301	419323.353	66530.05	162461.015	196394.088	521114.29
92	210216.314	427394.812	67479.812	166000.558	199153.98	525783.465
93	210216.314	430220.67	70865.008	175309.852	200875.08	533416.02
94	213800.249	438884.011	72185.35	175690.655	216284.65	539411.535
95	215115.937	454269.576	72870.496	176858.698	216619.364	592610.976
96	215230.604	474785.408	74483.8205	181637.878	217270	601783.13
97	218580.381	481841.321	75865.0992	189130.751	219110	614985.456
98	224590.267	539564.525	82030.5744	196677.184	221459.28	616200.504
99	230152.462	621893.883	86941.6	204279.794	223169.528	631875.428
100	241726.317	638303.702	90243.328	207583.708	224740	758050.77

Nota: Elaboración propia

**Anexo 4: Resultados de los “mejores” procesos de optimización
con método “ESA”**

Iter	Caso 1 - mejor		Caso 2 - mejor		Caso 3 - mejor	
	“ESA”	“SA”	“ESA”	“SA”	“ESA”	“SA”
1	855691.3	1012999.3	331935.8	302977.6	604285.1	3008043.5
2	618033.3	1012999.3	193938.9	302977.6	540768.3	3008043.5
3	515841.6	1012999.3	193938.9	302977.6	540768.3	2686505.6
4	515841.6	1012999.3	193938.9	62767.7	351768.6	2686505.6
5	515841.6	1012999.3	193938.9	62767.7	351768.6	2686505.6
6	515841.6	1012999.3	193938.9	62767.7	351768.6	2686505.6
7	515841.6	1012999.3	193938.9	62767.7	351768.6	1751917.0
8	389757.7	1012999.3	193938.9	62767.7	351768.6	1751917.0
9	389757.7	1012999.3	193938.9	62767.7	351768.6	1751917.0
10	389757.7	1012999.3	193938.9	62767.7	342537.3	1751917.0
11	389757.7	1012999.3	133900.8	62767.7	290661.9	1751917.0
12	389757.7	1012999.3	124520.6	62767.7	282106.8	1751917.0
13	389757.7	296729.1	117904.9	62767.7	273842.2	1751917.0
14	307842.3	296729.1	112402.4	62767.7	271734.0	1751917.0
15	298482.0	296729.1	110131.1	62767.7	271018.0	1586675.2
16	293994.3	296729.1	107585.1	62767.7	271018.0	1586675.2
17	292060.7	296729.1	106828.3	62767.7	271018.0	1586675.2
18	291613.4	296729.1	104580.3	62767.7	271018.0	1586675.2
19	291613.4	296729.1	104580.3	62767.7	271018.0	1586675.2
20	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
21	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
22	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
23	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
24	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
25	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
26	291613.4	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
27	238238.1	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
28	238238.1	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
29	238238.1	132264.3	103823.4	62767.7	176342.3	1483492.6
30	238238.1	132264.3	53604.4	62767.7	176342.3	857640.0
31	207082.1	132264.3	50810.5	62767.7	176342.3	857640.0
32	171082.1	132264.3	48877.3	62767.7	176342.3	857640.0
33	166925.4	132264.3	48490.6	62767.7	176342.3	857640.0
34	160108.1	132264.3	48109.8	62767.7	176342.3	857640.0
35	158023.0	132264.3	47729.0	62767.7	176342.3	857640.0

36	155984.6	132264.3	47475.5	62767.7	176342.3	857640.0
37	155984.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
38	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
39	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
40	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
41	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
42	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
43	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
44	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
45	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
46	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
47	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
48	155690.6	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	857640.0
49	141521.8	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	463897.0
50	138163.9	132264.3	47391.0	62767.7	176342.3	463897.0
51	126870.1	132264.3	47391.0	62767.7	126362.8	463897.0
52	124987.7	132264.3	47391.0	62767.7	119824.6	463897.0
53	123939.4	132264.3	47391.0	62767.7	116555.5	463897.0
54	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	114373.6	463897.0
55	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	463897.0
56	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	463897.0
57	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
58	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
59	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
60	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
61	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
62	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
63	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
64	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
65	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
66	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
67	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
68	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
69	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
70	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
71	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
72	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
73	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
74	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
75	123415.3	132264.3	47391.0	62767.7	112608.0	132594.1
76	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
77	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
78	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1

79	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
80	123413	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
81	12345.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
82	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
83	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
84	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
85	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
86	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
87	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
88	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
89	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
90	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
91	123415.3	132264.3	47391.0	49203.7	112608.0	132594.1
92	123415.3	132264.3	45941.5	49203.7	112608.0	132594.1
93	123415.3	132264.3	44018.5	49203.7	112608.0	132594.1
94	123415.3	132264.3	43634.4	49203.7	112608.0	132594.1
95	123415.3	132264.3	43515.3	49203.7	112608.0	132594.1
96	123415.3	132264.3	43515.3	49203.7	112608.0	132594.1
97	123415.3	132264.3	43336.6	49203.7	112608.0	132594.1
98	123415.3	132264.3	43336.6	49203.7	112608.0	132594.1
99	123415.3	132264.3	43336.6	49203.7	112608.0	132594.1
100	123415.3	132264.3	43336.6	49203.7	112608.0	132594.1

Nota: Elaboración propia

**Anexo 5: Parámetros eléctricos para los “mejores” casos obtenidos
mediante “ESA”**

Parámetros eléctricos de la red del Caso 1

Es (V)	Esmax (V)	Em (V)	Etmax (V)	Rg (Ω)
139.48	3383.52	582.39	1012.40	2.153
174.57	3269.60	444.31	983.92	2.133
309.44	3269.60	357.27	983.92	2.344
309.44	3269.60	357.27	983.92	2.344
309.44	3269.60	357.27	983.92	2.344
309.44	3269.60	357.27	983.92	2.344
309.44	3269.60	357.27	983.92	2.344
224.40	2684.28	299.73	837.59	2.116
224.40	2684.28	299.73	837.59	2.116
224.40	2684.28	299.73	837.59	2.116
224.40	2684.28	299.73	837.59	2.116
224.40	2684.28	299.73	837.59	2.116
224.40	2684.28	299.73	837.59	2.116
391.48	3187.60	931.22	963.42	2.591
167.40	3187.60	923.13	963.42	2.494
204.25	3187.60	901.85	963.42	2.566
203.85	3187.60	923.44	963.42	2.577
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
219.28	3187.60	921.91	963.42	2.595
251.06	2684.28	443.90	837.59	2.249
251.06	2684.28	443.90	837.59	2.249
251.06	2684.28	443.90	837.59	2.249
251.06	2684.28	443.90	837.59	2.249
378.32	2684.28	455.21	837.59	2.418
384.05	2684.28	552.51	837.59	2.420
397.81	2684.28	556.06	837.59	2.464
406.63	2684.28	573.59	837.59	2.513
1195.32	2684.28	677.54	837.59	2.562
1211.80	2684.28	678.84	837.59	2.587
1211.80	2684.28	678.84	837.59	2.587
2220.57	2684.28	763.67	837.59	2.595

275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554
275.48	2684.28	836.60	837.59	2.554

Nota: Elaboración propia

Parámetros eléctricos de la red del Caso 2

Es (V)	Esmax (V)	Em (V)	Etmx (V)	Rg (Ω)
125.86	4120.85	319.11	1204.21	0.359
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
1617.13	3652.04	303.35	1087.01	0.401
201.80	3652.04	438.99	1087.01	0.361
209.52	3652.04	461.87	1087.01	0.375
905.98	3652.04	473.22	1087.01	0.409
935.26	3652.04	489.03	1087.01	0.423
955.44	3652.04	490.32	1087.01	0.429
942.53	3652.04	522.15	1087.01	0.429
947.53	3652.04	524.87	1087.01	0.431
954.87	3652.04	536.00	1087.01	0.432
954.87	3652.04	536.00	1087.01	0.432
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
961.68	3652.04	536.60	1087.01	0.434
135.21	3130.68	720.20	956.67	0.394
398.22	3130.68	731.03	956.67	0.433
407.46	3130.68	748.25	956.67	0.444
409.37	3130.68	751.80	956.67	0.446
412.54	3130.68	753.31	956.67	0.448
415.77	3130.68	754.81	956.67	0.450
723.19	3130.68	823.85	956.67	0.456
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457

1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
1029.04	3130.68	870.22	956.67	0.457
195.59	3130.68	891.96	956.67	0.443
200.17	3130.68	913.11	956.67	0.454
201.96	3130.68	915.53	956.67	0.456
219.04	3130.68	923.79	956.67	0.459
219.04	3130.68	923.79	956.67	0.459
254.97	3130.68	941.65	956.67	0.463
254.97	3130.68	941.65	956.67	0.463
254.97	3130.68	941.65	956.67	0.463
254.97	3130.68	941.65	956.67	0.463

Nota: Elaboración propia

71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946
71.92	3352.50	213.50	1101.42	0.946

Nota: Elaboración propia

**Anexo 6: Parámetros de configuración para los “mejores” casos
obtenidos por “ESA”**

Parámetros de configuración de la red del Caso 1

Iter	x1x2	h	Lred	Lvar
1	1.2305	4.2	2472.54	140
2	1.2091	3.6	3933.3	600
3	1.1556	0.9	3003	436.8
4	1.1556	0.9	3003	436.8
5	1.1556	0.9	3003	436.8
6	1.1556	0.9	3003	436.8
7	1.1556	0.9	3003	436.8
8	1.2765	2.2	5711.79	1324.8
9	1.2765	2.2	5711.79	1324.8
10	1.2765	2.2	5711.79	1324.8
11	1.2765	2.2	5711.79	1324.8
12	1.2765	2.2	5711.79	1324.8
13	1.2765	2.2	5711.79	1324.8
14	1.06	0.8	1557.36	122.4
15	1.01	3.5	1519.56	26.4
16	1	2.4	1512	43.2
17	1	2.4	1449	50.4
18	1	2.1	1449	50.4
19	1	2.1	1449	50.4
20	1	2.1	1449	50.4
21	1	2.1	1449	50.4
22	1	2.1	1449	50.4
23	1	2.1	1449	50.4
24	1	2.1	1449	50.4
25	1	2.1	1449	50.4
26	1	2.1	1449	50.4
27	1.188	2	3573.36	163.2
28	1.188	2	3573.36	163.2
29	1.188	2	3573.36	163.2
30	1.188	2	3573.36	163.2
31	1.1	0.9	2990.4	27.2
32	1.1	0.9	2990.4	156
33	1.06	0.9	2936.64	2
34	1.02	0.9	2819.88	30
35	1.02	0.2	2819.88	30
36	1	0.2	2793	10
37	1	0.2	2793	10
38	1	0.1	2793	10

39	1	0.1	2793	10
40	1	0.1	2793	10
41	1	0.1	2793	10
42	1	0.1	2793	10
43	1	0.1	2793	10
44	1	0.1	2793	10
45	1	0.1	2793	10
46	1	0.1	2793	10
47	1	0.1	2793	10
48	1	0.1	2793	10
49	1.1918	3.5	1814.82	276
50	1.18	2.3	1806.42	52
51	1.06	2.3	1708.14	52
52	1.04	2.3	1691.76	92
53	1.04	1.7	1691.76	92
54	1.04	1.4	1691.76	92
55	1.04	1.4	1691.76	92
56	1.04	1.4	1691.76	92
57	1.04	1.4	1691.76	92
58	1.04	1.4	1691.76	92
59	1.04	1.4	1691.76	92
60	1.04	1.4	1691.76	92
61	1.04	1.4	1691.76	92
62	1.04	1.4	1691.76	92
63	1.04	1.4	1691.76	92
64	1.04	1.4	1691.76	92
65	1.04	1.4	1691.76	92
66	1.04	1.4	1691.76	92
67	1.04	1.4	1691.76	92
68	1.04	1.4	1691.76	92
69	1.04	1.4	1691.76	92
70	1.04	1.4	1691.76	92
71	1.04	1.4	1691.76	92
72	1.04	1.4	1691.76	92
73	1.04	1.4	1691.76	92
74	1.04	1.4	1691.76	92
75	1.04	1.4	1691.76	92
76	1.04	1.4	1691.76	92
77	1.04	1.4	1691.76	92
78	1.04	1.4	1691.76	92
79	1.04	1.4	1691.76	92
80	1.04	1.4	1691.76	92
81	1.04	1.4	1691.76	92
82	1.04	1.4	1691.76	92
83	1.04	1.4	1691.76	92

84	1.04	1.4	1691.76	92
85	1.04	1.4	1691.76	92
86	1.04	1.4	1691.76	92
87	1.04	1.4	1691.76	92
88	1.04	1.4	1691.76	92
89	1.04	1.4	1691.76	92
90	1.04	1.4	1691.76	92
91	1.04	1.4	1691.76	92
92	1.04	1.4	1691.76	92
93	1.04	1.4	1691.76	92
94	1.04	1.4	1691.76	92
95	1.04	1.4	1691.76	92
96	1.04	1.4	1691.76	92
97	1.04	1.4	1691.76	92
98	1.04	1.4	1691.76	92
99	1.04	1.4	1691.76	92
100	1.04	1.4	1691.76	92

Nota: Elaboración propia

Parámetros de configuración de la red del Caso 2

Iter	x1x2	h	Lred	Lvar
1	1.111	3.5	1718.5	420
2	1.1	0.1	2965	4.4
3	1.1	0.1	2965	4.4
4	1.1	0.1	2965	4.4
5	1.1	0.1	2965	4.4
6	1.1	0.1	2965	4.4
7	1.1	0.1	2965	4.4
8	1.1	0.1	2965	4.4
9	1.1	0.1	2965	4.4
10	1.1	0.1	2965	4.4
11	1.2544	2.1	1763.44	0
12	1.1556	2.1	1649.26	74.8
13	1.1128	0.2	1619.88	183.6
14	1.04	0.2	1563.88	183.6
15	1.01	0.2	1541.845	0
16	1.02	0.2	1469.19	32
17	1.01	0.2	1461.845	115.2
18	1.01	0.2	1404.78	59.2
19	1.01	0.2	1404.78	59.2
20	1	0.2	1398	149.6
21	1	0.2	1398	149.6
22	1	0.2	1398	149.6
23	1	0.2	1398	149.6
24	1	0.2	1398	149.6
25	1	0.2	1398	149.6
26	1	0.2	1398	149.6
27	1	0.2	1398	149.6
28	1	0.2	1398	149.6
29	1	0.2	1398	149.6
30	1.0812	3.8	827.41	46
31	1.0812	0.6	827.41	14
32	1.0302	0.6	807.41	147.2
33	1.02	0.6	803.41	44.8
34	1.01	0.6	799.455	14
35	1	0.6	795.5	44.8
36	1	0.3	795.5	44.8
37	1	0.2	795.5	156.4
38	1	0.2	795.5	156.4
39	1	0.2	795.5	156.4
40	1	0.2	795.5	156.4
41	1	0.2	795.5	156.4
42	1	0.2	795.5	156.4

43	1	0.2	795.5	156.4
44	1	0.2	795.5	156.4
45	1	0.2	795.5	156.4
46	1	0.2	795.5	156.4
47	1	0.2	795.5	156.4
48	1	0.2	795.5	156.4
49	1	0.2	795.5	156.4
50	1	0.2	795.5	156.4
51	1	0.2	795.5	156.4
52	1	0.2	795.5	156.4
53	1	0.2	795.5	156.4
54	1	0.2	795.5	156.4
55	1	0.2	795.5	156.4
56	1	0.2	795.5	156.4
57	1	0.2	795.5	156.4
58	1	0.2	795.5	156.4
59	1	0.2	795.5	156.4
60	1	0.2	795.5	156.4
61	1	0.2	795.5	156.4
62	1	0.2	795.5	156.4
63	1	0.2	795.5	156.4
64	1	0.2	795.5	156.4
65	1	0.2	795.5	156.4
66	1	0.2	795.5	156.4
67	1	0.2	795.5	156.4
68	1	0.2	795.5	156.4
69	1	0.2	795.5	156.4
70	1	0.2	795.5	156.4
71	1	0.2	795.5	156.4
72	1	0.2	795.5	156.4
73	1	0.2	795.5	156.4
74	1	0.2	795.5	156.4
75	1	0.2	795.5	156.4
76	1	0.2	795.5	156.4
77	1	0.2	795.5	156.4
78	1	0.2	795.5	156.4
79	1	0.2	795.5	156.4
80	1	0.2	795.5	156.4
81	1	0.2	795.5	156.4
82	1	0.2	795.5	156.4
83	1	0.2	795.5	156.4
84	1	0.2	795.5	156.4
85	1	0.2	795.5	156.4
86	1	0.2	795.5	156.4
87	1	0.2	795.5	156.4

88	1	0.2	795.5	156.4
89	1	0.2	795.5	156.4
90	1	0.2	795.5	156.4
91	1	0.2	795.5	156.4
92	1.0605	1.7	579.325	55.2
93	1.01	1.7	565.325	9.2
94	1	1.7	562.5	9.2
95	1	1.5	562.5	8.4
96	1	1.5	562.5	8.4
97	1	1.2	562.5	8.4
98	1	1.2	562.5	8.4
99	1	1.2	562.5	8.4
100	1	1.2	562.5	8.4

Nota: Elaboración propia

Parámetros de configuración de la red del Caso 3

Iter	x1x2	h	Lred	Lvar
1	1.09	1.9	4692.5	666.4
2	1.3806	2	6793.4	1346.4
3	1.3806	2	6793.4	1346.4
4	1.1536	4.6	5533.5	777.6
5	1.1536	4.6	5533.5	777.6
6	1.1536	4.6	5533.5	777.6
7	1.1536	4.6	5533.5	777.6
8	1.1536	4.6	5533.5	777.6
9	1.1536	4.6	5533.5	777.6
10	1.1235	2.6	3667.2	974.4
11	1.05	2.6	3547.5	403.2
12	1.01	2.6	3477.5	319.2
13	1.01	0.3	3477.5	319.2
14	1	0.3	3460	162
15	1	0.1	3460	228
16	1	0.1	3460	228
17	1	0.1	3460	228
18	1	0.1	3460	228
19	1	0.1	3460	228
20	1.1	0.1	3635	228
21	1.1	0.1	3635	228
22	1.1	0.1	3635	228
23	1.1	0.1	3635	228
24	1.1	0.1	3635	228
25	1.1	0.1	3635	228
26	1.1	0.1	3635	228
27	1.1	0.1	3635	228
28	1.1	0.1	3635	228
29	1.1	0.1	3635	228
30	1.1	0.1	3635	228
31	1.1	0.1	3635	228
32	1.1	0.1	3635	228
33	1.1	0.1	3635	228
34	1.1	0.1	3635	228
35	1.1	0.1	3635	228
36	1.1	0.1	3635	228
37	1.1	0.1	3635	228
38	1.1	0.1	3635	228
39	1.1	0.1	3635	228
40	1.1	0.1	3635	228
41	1.1	0.1	3635	228
42	1.1	0.1	3635	228

43	1.1	0.1	3635	228
44	1.1	0.1	3635	228
45	1.1	0.1	3635	228
46	1.1	0.1	3635	228
47	1.1	0.1	3635	228
48	1.1	0.1	3635	228
49	1.1	0.1	3635	228
50	1.1	0.1	3635	228
51	1.1118	2.3	1159.8	13.2
52	1.0506	2.3	1127.4	13.2
53	1.02	2.3	1111.2	44
54	1.02	0.4	1111.2	12
55	1	0.7	1100	12
56	1	0.7	1100	12
57	1	0.7	1100	12
58	1	0.7	1100	12
59	1	0.7	1100	12
60	1	0.7	1100	12
61	1	0.7	1100	12
62	1	0.7	1100	12
63	1	0.7	1100	12
64	1	0.7	1100	12
65	1	0.7	1100	12
66	1	0.7	1100	12
67	1	0.7	1100	12
68	1	0.7	1100	12
69	1	0.7	1100	12
70	1	0.7	1100	12
71	1	0.7	1100	12
72	1	0.7	1100	12
73	1	0.7	1100	12
74	1	0.7	1100	12
75	1	0.7	1100	12
76	1	0.7	1100	12
77	1	0.7	1100	12
78	1	0.7	1100	12
79	1	0.7	1100	12
80	1	0.7	1100	12
81	1	0.7	1100	12
82	1	0.7	1100	12
83	1	0.7	1100	12
84	1	0.7	1100	12
85	1	0.7	1100	12
86	1	0.7	1100	12
87	1	0.7	1100	12

88	1	0.7	1100	12
89	1	0.7	1100	12
90	1	0.7	1100	12
91	1	0.7	1100	12
92	1	0.7	1100	12
93	1	0.7	1100	12
94	1	0.7	1100	12
95	1	0.7	1100	12
96	1	0.7	1100	12
97	1	0.7	1100	12
98	1	0.7	1100	12
99	1	0.7	1100	12
100	1	0.7	1100	12

Nota: Elaboración propia