

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
Santiago - Chile



DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA
EL DISEÑO ÓPTIMO DE MALLA DE PUESTA
TIERRA MEDIANTE ALGORÍTMOS
METAHEURÍSTICOS

FELIPE SANTIAGO GUZMÁN QUEZADA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

Profesores Guías
Dr. Jorge Ardila Rey
Mg. Aldo Barrueto Guzmán

Co-referente
Rodrigo Castro González

3 de julio de 2018

*El tiempo tapará
todos los desprecios
que nos subyacen.*

Agradecimientos

Son muchas las personas que me acompañaron durante estos años en esta gran institución, por ello deseo dar las gracias a todos aquellos que estuvieron en este proceso y que aportaron de manera directa o indirecta en particular en este trabajo. Muchas gracias por la paciencia y la comprensión.

Gracias a mi familia por todo, a la Caro por confiar en mi y a todos mis amigos que están ahí siempre.

A TRANSELEC S.A por la oportunidad y el apoyo, y a Rodrigo y Alex por aportar en mi formación de manera integra.

Por último agradezco de pertenecer a esta institución, la UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, que me formó como profesional y en parte como persona. Las herramientas y los espacios que me entregó para crecer son invaluable.

Gracias a todos.

Resumen

La seguridad de las personas en una instalación eléctrica es un aspecto fundamental de estudio durante el diseño de las mismas, es decir, se desea minimizar o reducir en mayor medida los riesgos a los cuales pueden quedar sometidos los individuos bajo condiciones normales o anormales de funcionamiento. En este contexto, es que la malla de puesta a tierra corresponde a un elemento de referencia equipotencial a la cual se conectan todos los equipos de una subestación, con el objetivo de establecer un potencial común entre todos ellos.

El presente documento corresponde al estudio del diseño de la malla de puesta a tierra, enfocado en la minimización de costos de desarrollo de la misma. Para ello, primero se desarrolla una herramienta en MATLAB[®] que calcula la resistencia equivalente, las tensiones de contacto y paso en una superficie bajo la cual ha sido instalado este dispositivo. Posteriormente se desarrolla una segunda herramienta, que basada en un método metaheurísticos de optimización y en las restricciones establecidas por la IEEE STD. 80[™], es capaz de diseñar una malla para un número restringido de parámetros de entrada.

Los resultados obtenidos de la optimización son diseños que se diferencian de manera considerable de los observados en los distintos trabajos estudiados. Por un lado existe una disminución considerable de los costos asociados a la construcción, y la geometría de los diseños difiere de la utilizada tradicionalmente en la industria. Se debe considerar además, que todos los resultados poseen los parámetros técnicos como; resistencia, tensiones de paso y contacto, dentro de los rangos requeridos.

Por último se desarrolla una interfaz para el usuario enfocada en el apoyo de diseño de la malla de puesta a tierra para TRANSELEC S.A.

Abstract

Security in electric facilities is a fundamental aspect in its design process. Risks to which individuals are exposed during functioning, both in normal or abnormal conditions, have to be minimized. With this objective in mind, a grounding grid is utilized: an element of equipotential reference to which every other equipment in the substation is connected, with the goal of having a common potential amongst them.

The presented document analyzes the design characteristics of the grounding grid, with a clear focus on minimizing its costs. To that end, a suitable MATLAB[®] tool is implemented, which computes the equivalent resistance and contact & step tensions in a surface where a grounding grid has been installed. Then, based on meta-heuristic optimization methods and the constraints established by the IEEE STD. 80[™], the program is able to design an optimal grid given finite and well-defined inputs.

The designs obtained from the aforementioned process are significantly different from the ones observed in the current literature, both in the associated costs and its geometry. It should also be noted that every resulting design has its relevant parameters, such as resistance and contact & step tensions, in its desired intervals.

Lastly, a Graphical User Interface (GUI) is developed to allow TRANSELEC S.A. an easy understanding and usage of the tool for the design of its grounded grids.

Glosario

- **Altura de estrato superior** [m]: Espesor del estrato superior de un terreno de 2 estratos.
- **Corriente de Cortocircuito** [A]: Corriente residual dispersada por una puesta a tierra, después de aplicar los factores de reducción respectivos.
- **Diámetro del conductor** [m]: Diámetro del conductor con el que se construye la malla horizontal de la puesta a tierra, generalmente se usa un calibre 4/0 AWG.
- **Discretización por elemento** [$-$]: Parámetro de simulación utilizado para obtener una mayor precisión en los resultados, al discretizar en mayor medida los elementos de la malla. Un elemento en la malla se define como un tramo de conductor entre dos uniones.
- **Espesor de la gravilla** [m]: Espesor de la capa de material artificial de resistividad ρ_s .
- **Largo en X** [m]: Longitud en el eje x del área de cobertura de la subestación.
- **Largo en Y** [m]: Longitud en el eje y del área de cobertura de la subestación.
- **Máximo tiempo de despeje de falla** [s]: Tiempo en general, de duración de una sobretensión o una sobrecorriente.
- **Número de subdivisiones en X** [$-$]: Número de módulos de una malla rec-

tangular, en dirección del eje x .

- **Número de subdivisiones en Y** [-]: Número de módulos de una malla rectangular, en dirección del eje y .
- **Profundidad de enterramiento** [m]: Profundidad de enterramiento de los conductores horizontales de una puesta a tierra.
- **Resistividad de la gravilla** [Ωm]: Resistividad del material artificial que cubre el área abarcada por una puesta a tierra.
- **Resistividad superior del terreno** [Ωm]: Resistividad del estrato superior de un terreno de dos capas.
- **Resistividad inferior del terreno** [Ωm]: Resistividad del estrato inferior de un terreno de dos capas.

Índice general

Lista de figuras	X
Lista de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Metodología de Trabajo	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Tensiones Tolerables	5
2.1.1. Efecto de una Capa Superior de Gravilla	8
2.2. Parámetros de Diseño	9
2.2.1. Características del Terreno	10
2.2.2. Corriente de Cortocircuito	11
2.2.3. Geometría y Aspectos Constructivos de la Malla	12
2.3. Cálculo de Resistencia y Solicitaciones de Tensión en una Puesta a Tierra	13
3. Estado del Arte	17
3.1. Optimización de Parámetros	17
3.2. Optimización de Costos	19

4. Algoritmo Propuesto	23
4.1. Presentación del Problema	23
4.2. Función Objetivo	27
4.3. Restricciones	28
4.4. Metodología de Resolución	29
4.4.1. Algoritmo Genético	30
4.4.1.1. Codificación	31
4.4.1.2. Función de Adaptación	32
4.4.1.3. Cruce	32
4.4.1.4. Mutación	32
4.4.1.5. Criterio de Detención	32
5. Programación	34
5.1. Estructura e Interpretación de la Malla	34
5.2. Cálculo de Resistencia y Potencial Eléctrico	36
5.3. Algoritmo Genético	38
6. Validación de herramienta	40
6.1. INPROLEC S.A	41
6.2. FERDINAND KAUSEL BOLT	43
7. Diseño Optimizado	50
7.1. Procedimiento Propuesto	51
7.2. Consideraciones del Modelo	52
7.3. Optimización	54
7.3.1. Patio de 500 [kV]	55
7.3.2. Patio de 220 [kV]	57
7.3.3. Patio de Autotransformadores	57
7.4. Diseño Final	58
7.4.1. Análisis de los Resultados	63

8. Conclusiones	67
8.1. Trabajo Futuro	69
A. Resistencia en un Terreno Biestratificado	74
A.1. Resistencia mutua entre dos conductores horizontales paralelos, enterrados a igual profundidad [2]	74
A.2. Resistencia mutua entre dos conductores horizontales ortogonales entre sí, enterrados a igual profundidad [2]	76
B. Potenciales en un Terreno Biestratificado	78
C. Perfiles de Contorno del Potencial Superficial	80
D. Manual del Usuario PAT v.1	83

Índice de figuras

2.1. Tensiones de contacto y paso presentes en una instalación.	7
2.2. Terreno homogéneo y terreno biestratificado, modelos usualmente utilizados para caracterizar un terreno.	11
2.3. Electrodo y su imagen [2].	14
3.1. Representación de espaciamiento para ambas técnicas, con $k > 1$	18
4.1. Malla base para la definición de parámetros de la función objetivo. . . .	25
4.2. Diagrama de flujo de un AG simple.	31
4.3. Codificación de un individuo en el AG.	31
4.4. Cruce de dos individuos.	32
4.5. Mutación de un individuo.	33
5.1. Ejemplo de interpretación de nodos y elementos en una malla de 2×2 divisiones, discretización por elemento igual a 1.	35
5.2. Ejemplo de interpretación de nodos y elementos en una malla de 2×2 divisiones, discretización por elemento igual a 2.	35
5.3. Metodología utilizada para la aplicación de las funciones programadas.	38
6.1. Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, diseño INPROLEC S.A.	42
6.2. Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, diseño F.K.B.	44
6.3. Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, considerando solo el patio de 500 [kV].	45

6.4. Tensiones de contacto en el patio de 500 [kV].	45
6.5. Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, considerando solo el patio de 220 [kV].	46
6.6. Tensiones de contacto en el patio de 220 [kV].	47
6.7. Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, considerando solo el patio de Auto-transformadores.	48
6.8. Tensiones de contacto en el patio de Auto-transformadores.	48
7.1. Dimensiones generales utilizadas para el diseño de la malla de puesta a tierra de la subestación Entre Ríos [27].	54
7.2. Progresión de resultados del algoritmo genético para el patio de 500 [kV] de la subestación.	56
7.3. Progresión de resultados del algoritmo genético para el patio de 220 [kV] de la subestación.	57
7.4. Progresión de resultados del algoritmo genético para el patio de auto-transformadores de la subestación.	58
7.5. Diseño de la malla de puesta a tierra de la subestación Entre Ríos [27], sin reticulado de malla entre patios.	59
7.6. Potencial eléctrico en la superficie del terreno, respectivo a la malla de la Figura (7.5) y una dispersión total de corriente igual a 41,460[kA].	61
7.7. Tensiones de contacto obtenidas para la malla de la Figura (7.5) y una dispersión total de corriente igual a 41,460[kA].	62
7.8. Tensiones de malla, para un terreno homogéneo	65
A.1. 2 elementos horizontales paralelos, enterrados a igual profundidad t ($h > t$) [2].	74
A.2. 2 elementos horizontales ortogonales, enterrados a igual profundidad t ($h > t$) [2].	76
B.1. conductor horizontal recto ubicado en el estrato superior de un terreno formado por 2 estratos [2].	78

C.1. Perfiles de contorno de potencial superficial en el plano XZ.	81
C.2. Perfiles de contorno de potencial superficial en el plano YZ.	82

Índice de tablas

4.1. Costos de suministros y montaje de una malla de puesta a tierra. Costos presentados en una base común por confidencialidad.	28
6.1. Valores obtenidos para la Malla Completa de INPROLEC S.A	42
6.2. Comparación de resultados entre software utilizado por F.K.B y la herramienta desarrollada en el patio de 500 [kV].	46
6.3. Comparación de resultados entre software utilizado por F.K.B y la herramienta desarrollada en el patio de 220 [kV].	47
6.4. Comparación de resultados entre software utilizado por F.K.B y la herramienta desarrollada en el patio de auto-transformadores [kV].	49
7.1. Subdivisión de corriente total dispersada, proporcional al área de cobertura de cada patio.	54
7.2. Valores óptimos para el diseño del patio de 500 [kV] mediante el algoritmo genético.	56
7.3. Valores óptimos para el diseño del patio de 220 [kV] mediante el algoritmo genético.	57
7.4. Valores óptimos para el diseño del patio de autotransformadores [kV] mediante el algoritmo genético.	58
7.5. Tensiones máximas de contacto en cada patio de la subestación Entre Ríos, para el diseño de malla de la Figura (7.5)	62

7.6. Resumen comparativo de; valores medidos en la subestación y límites establecidos por la norma IEEE STD. 80 TM , según las consideraciones constructivas de la malla de puesta a tierra.	63
7.7. Costos totales de suministros y montajes de cada diseño, calculados a partir de la ecuación (4.2)	63

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

El diseño correcto de una malla de puesta a tierra posee principalmente dos objetivos; proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica hacia la tierra bajo condiciones de falla, sin afectar la continuidad del servicio y proteger a los individuos y equipos, de tensiones de choque y límites operacionales respectivamente [1].

En la literatura se encuentran implementados diversos métodos de diseño para una malla de puesta a tierra, métodos basados en un modelo simplificado de terreno homogéneo [1] y otros que requieren de la utilización de recursos computacionales para la caracterización del terreno [3]. Las variables que definen el diseño de una malla de puesta a tierra son de tipo geométrico y técnico, dentro de las cuales se incluyen el número de conductores, el área y tipo de conductor, distancia entre los conductores, la profundidad a la que se entierra la malla y el número de varillas, tipo de suelo y corriente de cortocircuito, entre otros. Una vez definido un diseño este debe ajustarse a las tensiones de paso y toque entregadas por la norma [1], de no ser así este debe modificarse para cumplirlas.

Puesto que el diseño de una malla de puesta a tierra conlleva un número considerable de variables la optimización de este proceso no posee una elaboración definida, por lo tanto, es recomendable y necesario recurrir a técnicas de optimización más elaboradas

para su desarrollo.

Los algoritmos metaheurísticos presentan una oportunidad de optimización muy precisa para problemas que tienen asociadas numerosas variables y que no poseen una heurística definida [8], como es el caso expuesto. Existen publicados múltiples enfoques para la optimización del diseño de la malla de puesta a tierra utilizando este tipo de algoritmos, algunos de ellos plantean su función objetivo para la minimización de parámetros técnicos [9] y otros análisis enfocados en la minimización de costos de construcción [10] [9] considerando costos de materia prima, excavación y mano de obra. Todos estos métodos han entregado resultados confiables y válidos en el problema de optimización de una malla de puesta a tierra.

Actualmente la empresa TRANSELEC S.A es asesorada en el diseño de las mallas de puesta a tierra mediante la empresa FERDINAND KAUSEL BOLT, por lo tanto, no existe un conocimiento acabado sobre este proceso más allá de lo expuesto en [14] que corresponde a una descripción simplificada. Con el fin de poseer una herramienta propia de diseño, que les permita controlar y contrastar el proceso y sus distintas variables, es que nace la necesidad de desarrollar una herramienta computacional que realice esta tarea considerando aspectos técnicos incluidos en la norma IEEE STD. 80TM y sopesando los costos asociados a la construcción de la misma. Por ello, y considerando lo comentado en los párrafos previos, es que se propone el uso de un algoritmo metaheurístico enfocado en la optimización de costos de diseño.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta que, mediante el uso de algoritmos de optimización metaheurísticos, permita mejorar el diseño de la malla de puesta a tierra de subestaciones, acorde a los estándares de la norma IEEE STD. 80TM y considerando requerimientos técnico-económicos establecidos por TRANSELEC S.A.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar metodologías de diseño óptimo de mallas de puesta a tierra basadas en la norma IEEE STD. 80TM que integren algoritmos de optimización metaheurístico.
- Proponer y modificar, en base a los requerimientos de TRANSELEC S.A, una metodología de diseño óptimo de malla de puesta a tierra que considere aspectos normativos, técnicos y económicos.
- Implementar una herramienta computacional en MATLAB[®], basada en la metodología propuesta, que permita diseñar una malla de puesta a tierra con los valores más óptimos.
- Validar la herramienta mediante la comparación de costos de dos diseños, uno obtenido a partir del método propuesto y otro concebido de la metodología tradicional de TRANSELEC S.A.

1.3. Metodología de Trabajo

En base a los antecedentes generales y a los objetivos fijados, se desarrolla la siguiente metodología de trabajo para el desarrollo de la memoria.

- I) *Marco teórico*: Se desarrolla un apartado donde se definen y caracterizan las mallas de puesta a tierra, se presentan sus principales funciones en conjunto con las características técnicas requeridas por las normas nacionales e internacionales.
- II) *Revisión del estado del arte*: Lectura relativa a la optimización del diseño de malla de puesta a tierra, que incluye la norma IEEE STD. 80TM y artículos publicados recientemente que proponen nuevos métodos basados en técnicas metaheurísticas. En conjunto se recopilan metodologías de cálculo en torno a las mallas de puesta a tierra, cálculos que desarrollen expresiones teóricas para la resistencia y sollicitaciones voltaje.

- III) *Diseño del Algoritmo*: En base a la información recolectada en el apartado anterior se propone la implementación de un método de optimización que integre los parámetros más adecuados con el fin de disminuir los costos, sujeto a restricciones normativas establecidas por la norma IEEE STD. 80TM. Se define la función objetivo y las restricciones del problema.
- IV) *Programación del Algoritmo*: Se programa el algoritmo propuesto en MATLAB[®], considerando dos grandes rutinas de trabajo independientes. La primera debe ser capaz de calcular las restricciones teóricas establecidas por las normas, y la segunda debe optimizar el diseño basada en la función objetivo propuesta.
- v) *Validación de herramienta de cálculo*: A partir de una memoria de cálculo de una malla ya diseñada para TRANSELEC S.A se crea un caso de estudio que pueda ser ingresado en el programa de cálculo de restricciones, esto con el objetivo de validar los resultados obtenidos mediante la comparación de resultados entregados por los distintos software del mercado.
- VI) *Diseño de una malla*: Se diseña una malla de puesta a tierra para una subestación existente en base al algoritmo propuesto. Se realiza una comparación entre los parámetros de diseño con la finalidad de establecer el cumplimiento de los objetivos.

Capítulo 2

Marco Teórico

La IEEE STD. 80TM define la malla a tierra como un “Sistema de electrodos a tierra interconectados, dispuestos en un patrón sobre un área específica y enterrado bajo la superficie de la tierra” [1]. El diseño seguro de una malla a tierra se basa en dos objetivos:

- Proveer un medio para conducir la corriente eléctrica a tierra bajo condiciones de falla, sin exceder ningún límite operacional y de equipo, ni afectar la continuidad del servicio.
- Reducir el riesgo de aplicación de diferencias de potencial peligrosos en una persona ubicada en las cercanías de las instalaciones.

En base a lo anterior es esencial distinguir cuales son las restricciones establecidas de manera directa en los objetivos mencionados, y a su vez, cuales son las variables que influyen en el cálculo de estas. Por lo tanto, a continuación se realiza un repaso general de las principales restricciones establecidas por la norma IEEE STD. 80TM y los parámetros de diseño que influyen de forma directa en el cálculo de esta variables.

2.1. Tensiones Tolerables

Los niveles de corriente que un ser humano puede soportar y el tiempo máximo de despeje son trascendentales para el diseño de una malla de puesta a tierra, principal-

mente porque estos definen el límite de tensión que puede soportar un operario dentro de las instalaciones.

En el año 1968 C. Dalziel y R. Lee [17] postulaban una ecuación (Ecuación 2.1) que relacionaba el máximo valor de corriente que puede soportar un ser humano, con el tiempo durante el cual está sometido a esa corriente. Las condiciones para aplicar esta ecuación son; un promedio de 50 [kg] en el individuo y una duración de 0.008 a 5 [s] el flujo de corriente.

$$I = \frac{0,116}{\sqrt{T}} \quad (2.1)$$

Donde:

- I : Corriente máxima que puede circular sin producir fibrilación muscular, en Amperes.
- T : Tiempo de circulación de la corriente I , en segundos.

En consecuencia, conocer el tiempo por el cual transcurre la falla es transcendental para definir las principales restricciones de un diseño de una malla a tierra. Diversos autores difieren en la metodología para definir este tiempo, pues algunos consideran que este debe estar determinado por el ‘Tiempo de Despeje de Falla’ [18] de los sistemas de protección de una instalación sin considerar los equipos de respaldo [2], pues la probabilidad de que se suceda un evento de este tipo es muy baja. Por otro lado, otros consideran que el tiempo de actuación de los relés de respaldo siempre debe ser considerado como parte de un criterio conservador [19], pues mientras mayor sea el tiempo de despeje de la falla, mayor serán las restricciones que se exijan sobre el desempeño de la malla.

En Chile, los tiempos de despeje de falla para sistemas de protección están regidos por la ‘NORMA TÉCNICA DE CALIDAD Y SEGURIDAD DE SERVICIO’ [18], los cuales se encuentran definidos en función de las características de los elementos protegidos.

Por lo tanto no existe un valor exacto para el tiempo de despeje de falla, sino más bien, este debe ser seleccionado en función de las características de cada proyecto a

evaluar. Sin embargo en la norma IEEE STD. 81TM se sugiere utilizar tiempos menores a 0.5 [s].

El principal riesgo al que se puede ver sometido un operario mientras ocurre una falla, es que se le aplique una tensión suficiente para generar una corriente que supere el umbral tolerable expuesto previamente. Los eventos que poseen mayor probabilidad de ocurrencia han sido estudiados ampliamente por la literatura y principalmente son; tensión aplicada entre ambos pies cuando existe una distancia de 1 [m] entre ellos, y tensión aplicada entre mano y pie cuando el operario está en contacto con una estructura conectada a tierra.

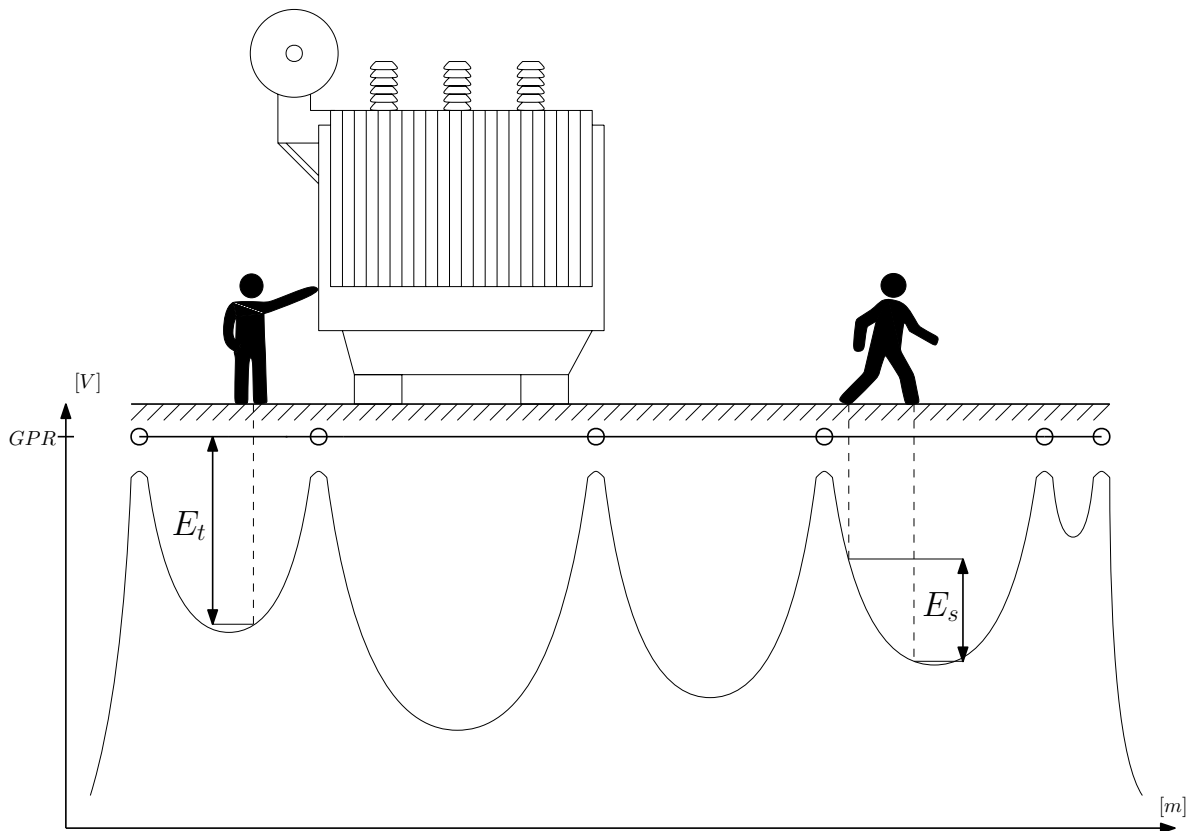


Figura 2.1: Tensiones de contacto y paso presentes en una instalación.

En la Figura (2.1) se puede observar la descripción gráfica de ambas tensiones. La curva inferior representa el potencial superficial generado a partir de la circulación de corriente en la malla de puesta a tierra (círculos), la obtención de esta distribución de potencial será abordado más adelante. La tensión de contacto (E_t) queda determinada por la diferencia de potencial que existe entre el potencial de la malla y el potencial al

que se eleva la superficie del terreno donde se encuentra parado el operario, mientras que la tensión de paso (E_s) queda determinada por la diferencia de potencial entre ambos pies, determinada básicamente por el potencial en la superficie del terreno.

A partir de un análisis circuital simple y la corriente tolerable por un ser humano, es posible obtener las tensiones de contacto y paso límites para un operador de una subestación. La norma IEEE STD. 81TM las define como:

$$E_s = (R_B + 2R_f) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{T}} \quad (2.2)$$

$$E_t = (R_B + \frac{R_f}{2}) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{T}} \quad (2.3)$$

Donde:

- E_s : Tensión de paso límite en Volts, para una persona de 50 [Kg] y una distancia de 1 [m].
- E_t : Tensión de contacto límite en Volts, para una persona de 50 [Kg].
- R_B : Resistencia del cuerpo humano en Ohms, usualmente 1000 [Ω]
- R_f : Resistencia a tierra de un pie en Ohms, despreciando la magnitud de la puesta a tierra.

2.1.1. Efecto de una Capa Superior de Gravilla

Usualmente se utiliza una capa superior de gravilla de alta resistividad en la subestaciones, esto tiene por objetivo aumentar la resistencia de contacto entre el terreno y el pie del operario. De esta manera, como se observa en las ecuaciones (2.2) y (2.3), es posible aumentar el límite de las restricciones aumentando el valor R_f . Las ecuaciones que se presentan a continuación se pueden aplicar bajo la condición de que la resistividad del terreno sea menor que la de la gravilla, puesto que es posible asumir que la tensión superficial sin o con la capa es la misma.

Considerando una capa de gravilla de resistividad $\rho_s[\Omega m]$ los límites de contacto y paso quedan determinados como:

$$E_s = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.4)$$

$$E_t = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.5)$$

Donde t_s [s] es la duración de la circulación de corriente por el cuerpo del operario y C_s corresponde al factor de reducción de la capa superficial y se calcula como:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (2.6)$$

ρ es la resistividad superior del terreno en $[\Omega m]$ y h_s el espesor de la gravilla utilizada en $[m]$.

Este factor de reducción C_s no es aplicable cuando la resistividad del terreno bajo la capa de gravilla es mayor que la resistividad de la gravilla, puesto que la consideración de que la tensión superficial es la misma con o sin la capa, no se cumple.

2.2. Parámetros de Diseño

En la literatura existen diversos estudios y análisis relacionados con el cálculo de solicitaciones en una malla a tierra [2, 7], donde se distinguen tres grandes áreas de estudio de parámetros que influyen en el cálculo de las solicitaciones de una malla a tierra. Estas son:

- a. Características del terreno.
- b. Características de la falla.
- c. Geometría y aspectos constructivos de la malla.

Cada una de estas áreas de estudio posee parámetros que influyen en el desempeño

de la malla de puesta tierra y por lo tanto deben ser considerados al momento de realizar un diseño.

El presente trabajo se centra en el estudio de la geometría y aspectos constructivos de la malla, considerando que los parámetros asociados a las otras áreas son calculados de acuerdo a las normas internacionales y nacionales respectivas.

2.2.1. Características del Terreno

La resistividad específica de un terreno es una variable esencial para el diseño y análisis de una malla de puesta a tierra, pues influye de manera directa en el valor de la resistencia y tensión que pueden surgir en una S/E. Esto se debe principalmente a que el terreno es utilizado como un gran medio conductor para las corrientes que se desean dispersar bajo un falla, por lo tanto este representa el medio dieléctrico bajo el cual surgen potenciales eléctricos debido a la circulación de corriente por la malla.

Lo usual es que los terrenos estén formados por diversas capas de resistividades paralelas al suelo, esto depende en gran medida por el material mineral que contenga, la composición química de las sales, la cantidad de humedad y temperatura.

Existen diversas metodologías de medición de resistividades, pero todas, en gran medida, se basan en la medición de caída de potencial que se registra al inyectar corriente en el terreno. La diferencia entre cada método se basa en la configuración geométrica de los elementos, y por lo tanto en la interpretación de los datos. Las configuraciones más conocidas son las de *Wenner* [16] y la de *Schlumberger* [15].

Una correcta interpretación de los datos obtenidos en los ensayos antes mencionados, debe ser capaz de derivar un modelo del terreno que sea una buena aproximación del real. Los modelos más usados son el homogéneo o uniforme y el biestratificado, como se observa en la Figura (2.2).

Encontrar una condición óptima de terreno en la práctica, como para representarlo como un terreno homogéneo es poco probable. Mientras que el modelo biestratificado es una buena aproximación de una gran cantidad de terrenos, este consta de un primer estrato de altura definida, y de una segunda de profundidad infinita. Una mayor estrati-

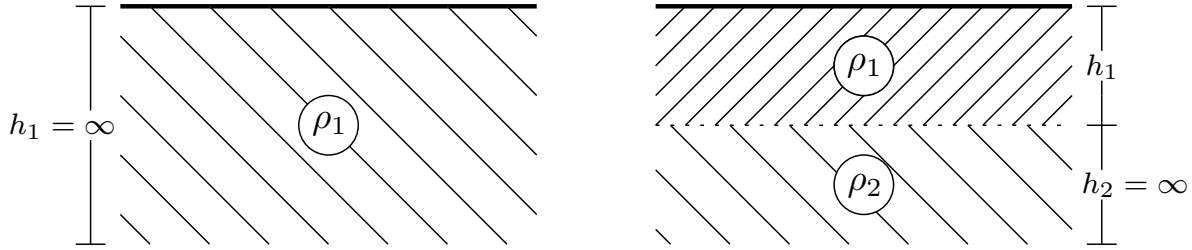


Figura 2.2: Terreno homogéneo y terreno biestratificado, modelos usualmente utilizados para caracterizar un terreno.

ficación, dependiendo de las condiciones, puede ser contraproducente por la complejidad que representa el análisis de una malla en un terreno de estas características.

2.2.2. Corriente de Cortocircuito

La magnitud de corriente que debe dispersar la malla a tierra es en gran medida el factor que determina la condición de riesgo al interior de una instalación. Esta corriente es proporcional al valor de la corriente de cortocircuito que surge por una falla del sistema, por lo tanto es necesario definir la relación existente entre ambas variables.

La norma IEEE STD. 80TM define los siguientes conceptos:

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (2.7)$$

Donde:

- I_g : Corriente rms simétrica de malla y corresponde a la porción que fluye efectivamente entre la malla y el terreno, en Amperes.
- I_f : Corriente rms simétrica de falla a tierra, en Amperes.
- S_f : Factor de división de corriente, y relaciona la corriente simétrica de la falla con el valor efectivo de corriente simétrica que se dispersa por la malla.

El factor S_f es un valor que debe ser calculado mediante simulación [1] y considerando los siguientes factores:

- Ubicación de la falla.

- Impedancia de la malla a tierra de la subestación.
- Tuberías enterradas y cables cercanos o conectados directamente al sistema de tierra de la subestación.
- Cables de guardia, neutros o retornos por tierra.

Un cortocircuito incluye componentes de subtransitorio, transitorio y de valor continuo. Para incluir el efecto de la componente continua se define una constante D_f que se calcula en función de la relación X/R existente el punto de falla y de la duración de la falla t_s [s].

Finalmente se define la máxima corriente que dispersa la malla como:

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (2.8)$$

Se establece el siguiente procedimiento para la obtención de la máxima corriente de malla [1]:

- a) Cálculo del máximo valor de cortocircuito en la instalación [20].
- b) Cálculo del factor de división de corriente S_f mediante simulación.
- c) Determinar el valor del factor D_f en función del tiempo de falla y la relación X/R .
- d) Seleccionar el mayor valor de $D_f \cdot I_g$ de tal manera de elegir la peor condición de falla del sistema.

2.2.3. Geometría y Aspectos Constructivos de la Malla

La geometría también es determinante en el desempeño de una malla de puesta a tierra, principalmente porque la distribución de corriente a lo largo de los conductores está determinada directamente por la resistencia eléctrica de los elementos que componen la malla y esta se encuentra relacionada con la distribución espacial de la misma.

El área o sección de conductor también es una variable que se debe determinar en función de la corriente que circulará, con el objetivo de no superar los límites térmicos del material.

Por lo tanto los elementos geométricos y constructivos que definen el desempeño de una malla a tierra son; la distribución espacial de los elementos conductores en el terreno, la profundidad de enterramiento de estos elementos y la sección y tipo de conductor utilizado.

2.3. Cálculo de Resistencia y Solicitaciones de Tensión en una Puesta a Tierra

El análisis para el cálculo teórico del desempeño de una malla de puesta a tierra posee un extenso desarrollo en la literatura [2, 3, 5, 6], el cual se encuentra enfocado principalmente en la representación infinitesimal de un elemento conductor que conduce un cierto nivel de corriente y se encuentra inmerso en un espacio compuesto por un estrato de tierra y otro de aire.

El desarrollo presentado a continuación corresponde a un resumen del expuesto en [2], esto se realiza principalmente para mayor comprensión del fenómeno eléctrico y porque corresponde a la base teórica para el posterior desarrollo para una terreno biestraficado.

Se supone un electrodo de largo l inmerso en un terreno de resistividad ρ , con la otra porción del espacio compuesto por aire. Se asume que por el electrodo circula una corriente de densidad lineal $i(s)$ y magnitud I . Si desea conocer el potencial eléctrico en un punto $P(x, y, z)$ cualquiera en el espacio, es necesario considerar las condiciones de borde en el límite entre el terreno y el aire. Para facilitar el desarrollar de las ecuaciones teóricas se utiliza el método de las imágenes, que genera una superficie equipotencial permitiendo considerar un espacio de resistividad homogénea. Lo antes descrito se observa en la Figura (2.3).

El valor del potencial en el punto P , producido por una elemento de longitud ds ,

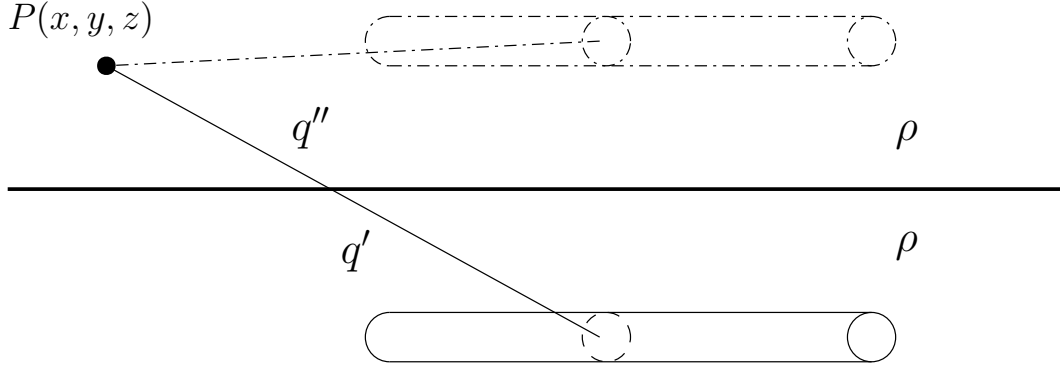


Figura 2.3: Electrodo y su imagen [2].

queda determinado por la siguiente ecuación:

$$d\phi_P = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{i(s)}{q'} + \frac{i(s)}{q''} \right] ds \quad (2.9)$$

Si se considera una densidad lineal de corriente entonces la solución es:

$$\phi_P = \frac{\rho I}{4\pi l} \int_S \left[\frac{1}{q'} + \frac{1}{q''} \right] ds \quad (2.10)$$

A partir de la ecuación (2.10) es posible determinar el potencial en cualquier punto del espacio y también el del propio electrodo (considerando como punto de cálculo, el punto central \hat{s} del electrodo). Con esto es posible calcular la resistencia del propio electrodo como:

$$R = \frac{\phi_P(\hat{s})}{I} \quad (2.11)$$

De manera similar es posible calcular la resistencia mutua entre electrodos a partir de la variación del potencial de uno de ellos a partir de la corriente circulante en el otro.

El desarrollo de estas ecuaciones se pueden encontrar en [2], allí se encuentran explicitadas de manera más específica para ciertas configuraciones geométricas y extendidas para un terreno biestratificado.

Ahora, se supone un conjunto de n electrodos en el mismo espacio descrito previamente. A partir de las ecuaciones antes mencionadas es posible establecer un sistema de ecuaciones que relaciona los potenciales de cada electrodo, la corriente que circula

por cada uno y las respectivas resistencias propias y mutuas.

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \cdot \\ \phi_i \\ \cdot \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1i} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2i} & \dots & R_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ R_{i1} & R_{i2} & \dots & R_{ii} & \dots & R_{in} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{ni} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_i \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Si se considera que los n elementos se encuentran conectados galvánicamente, entonces es posible asumir que los electrodos poseen el mismo potencial ϕ_0 [2]. Por lo tanto es posible invertir la matriz de resistencias (conductancias) para obtener el valor de corriente dispersado por cada electrodo.

$$I_i = \phi_o \sum_{j=1}^n G_{ij} \quad (2.13)$$

Pero, como se conoce el valor total de la corriente dispersada, es posible obtener que:

$$I = \phi_o \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} \quad (2.14)$$

Y por lo tanto se puede calcular el valor de la **resistencia de la puesta tierra**, como:

$$R = \frac{\phi_o}{I_{tot}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij}} \quad (2.15)$$

Con esto ya es posible conocer uno de los parámetros críticos de una malla de puesta a tierra. Para calcular las tensiones de paso y contacto se debe calcular el GPR de la malla, que corresponde al potencial al que se eleva el conjunto de conductores que componen la malla en el momento que circula una corriente por estos. Para esto solo basta con multiplicar el valor de resistencia de la malla por la corriente total dispersada, como se observa en la ecuación (2.16).

$$GPR = \phi_0 = I \cdot R \quad (2.16)$$

Las **tensiones de contacto** corresponden a la **diferencia entre el potencial existente en la superficie del terreno y el GPR** , por lo tanto para su cálculo basta restar al GPR el valor del potencial en el punto en el cual se desea obtener la tensión de contacto.

La **tensión de paso** se presenta cuando existe una separación de 1 [m] entre ambos pies de un operario en la instalación, por lo tanto corresponde a la **diferencia de potencial entre dos puntos, distanciados en un 1[m], del potencial superficial** generado por la circulación de corriente en la malla.

Capítulo 3

Estado del Arte

La optimización del diseño de la malla de puesta a tierra ha sido objeto de estudio desde el año 1975 [3], principalmente porque el progresivo crecimiento de los sistemas de potencias y los niveles de tensión ha requerido una revisión de los criterios de diseño para asegurar la seguridad de las personas y la integridad de los equipos.

A continuación se presentarán a grandes rasgos dos enfoques utilizados para optimizar la malla de puesta a tierra, estos no consideran el cálculo bajo el cual se obtienen los valores de las restricciones ni la metodología bajo la cual se encuentra el valor óptimo de la función objetivo.

3.1. Optimización de Parámetros

Como se ha mencionado previamente, los parámetros críticos de diseño de una malla de puesta a tierra son; resistencia equivalente de la malla, tensión máxima de contacto y tensión máxima de paso. Estos parámetros dependen principalmente de la disposición geométrica de los conductores, y por lo tanto del espaciamiento y profundidad de enterramiento. Estas son variables fácilmente manipulables que permiten mejorar el desempeño de un diseño base.

En [9] se presenta la función multi-objetivo:

$$T_{min}f(X) = [f_1(X), f_2(X), f_3(X)]^T \quad (3.1)$$

Donde cada componente de la función $f(X)$ representa una función objetivo individual de cada parámetro crítico (resistencia, tensión de contacto y paso). T_{min} representa la minimización de cada uno.

Por otro lado en [21] se presenta un metodología para mallas espaciadas de manera regular con igual número (n) de conductores verticales y horizontales. Para ello se definen dos técnicas matemáticas para calcular el espaciamiento irregular entre conductores.

La primera, llamada ‘*sequential multiplication technique*’ define la distancia entre un conductor y el siguiente, como:

$$d(m + 1) = \alpha \cdot d(m) \tag{3.2}$$

Donde α corresponde a un factor de espaciamiento, $d(m)$ la distancia regular previa y $d(m + 1)$ la distancia posterior a utilizar.

Por otro lado se presenta la ‘*sequential power technique*’ que define la distancia entre un conductor y el siguiente, como:

$$d(m + 1) = (d(m))^\beta \tag{3.3}$$

Al igual que en la técnica previa, β representa el factor de espaciamiento. Las técnicas descritas se presentan en la Figura (3.1).

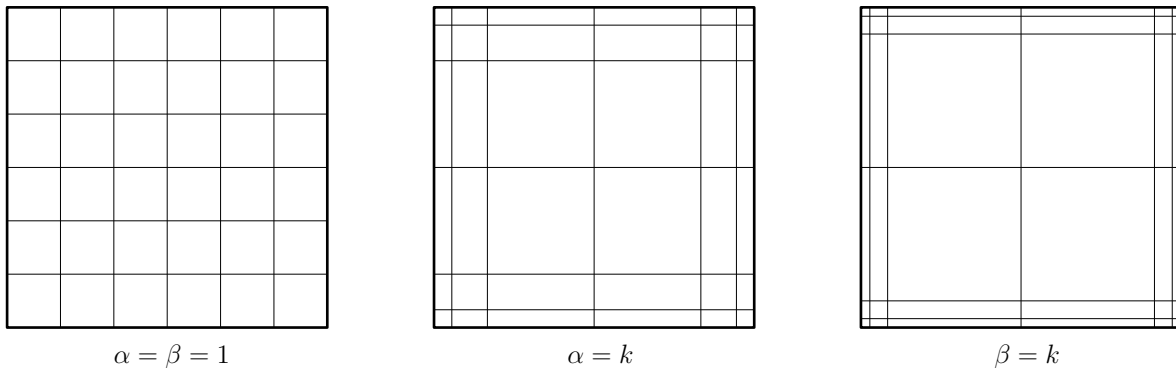


Figura 3.1: Representación de espaciamiento para ambas técnicas, con $k > 1$.

3.2. Optimización de Costos

Durante el proceso de diseño de una malla, son numerosas las consideraciones conservadoras que se realizan con el fin de asegurar las condiciones de seguridad dentro de una subestación. Es por esta razón que los diseños pueden presentar un sobre-dimensión en términos de seguridad, y esto se traduce directamente en el aumento de costos del proyecto. Principalmente esto se debe a que si mayor es la cantidad de conductor enterrado en el suelo, menores son las diferencias de potencial aplicadas para un usuario en una condición anormal de funcionamiento. Por ello, diversos autores [9] [10] [13], consideran que los costos asociados a un proyecto de malla de puesta a tierra deben ser sopesados al momento de realizar el diseño.

Los parámetros críticos en el diseño de una malla, como resistencia y tensiones de paso y contacto, definen las restricciones mínimas que este debe cumplir. Por lo tanto, si se conocen las restricciones del problema, entonces solo basta con formular una ecuación representativa de los costos de tal manera que pueda ser definida como la función objetivo del problema.

En términos generales, los costos asociados a la construcción de una malla de puesta a tierra son; la cantidad de conductor a enterrar, volumen de terreno removido, termofusiones para los empales de conductores, volumen de gravilla de alta resistividad y la mano de obra asociada a la ejecución e instalación de cada tarea e insumo mencionado, respectivamente.

A continuación, se exponen las diferentes ecuaciones formuladas en la literatura para definir los costos asociados a un proyecto de malla de puesta a tierra.

Costos y Factor de Penalización [10]

En [10], los costos de una malla se definen como:

$$\begin{aligned}
 f(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s) = & (C_{1cmat}(\pi d_c^2/4) + C_{1inst} + C_{2exc}h_{etrch}) \\
 & [(N_x + 1)L_y + (N_y + 1)L_x] + \\
 & + (C_{3rmat}(\pi d_r^2/4) + C_{3rinst})[N_r L_r] + \\
 & + (C_{4gmat} + C_{4ginst})[L_x L_y h_s] + \\
 & + K(\Delta V_t + \Delta V_s + \Delta R_g)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Donde, el primer término de la ecuación se encuentra asociado a; costo del conductor, costo de instalación y costos de excavación para todo ese material. En caso de instalar varillas verticales, el segundo término considera los insumos y su instalación. El volumen de gravilla necesario se considera en el tercer término.

Los valores definidos como C_x , con x como un sufijo cualquiera, son las constantes de costos en las unidades respectivas del insumo o montaje valorizado.

El último término corresponde a un factor de penalización asociado a las restricciones técnicas de la malla. Para ellos se definen siguientes funciones:

$$\Delta V_t = \begin{cases} (V_t - V_{touch70}) & V_t > V_{touch70} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \tag{3.5}$$

$$\Delta V_s = \begin{cases} (V_s - V_{step70}) & V_s > V_{step70} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \tag{3.6}$$

$$\Delta R_g = \begin{cases} (R_g - R_{gs}) & R_g > R_{gs} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \tag{3.7}$$

Se establece K , en la ecuación (3.4), como un coeficiente de valor 10^6 . De esta manera, si alguno de los valores medidos de tensión de contacto (Ecuación 3.5), tensión de paso (Ecuación 3.6) o resistencia de la malla (Ecuación 3.7) es mayor que el establecido por la norma, entonces el valor de la función objetivo se incrementa de manera de

descartar esta posible solución.

La metodología de solución propuesta es la aplicación de tres algoritmos metaheurísticos secuenciales, de tal manera de asegurar una solución óptima.

Costos y Restricciones Adicionales [13]

En el caso [13], la función objetivo es creada con ciertas restricciones adicionales, correspondientes a criterios de diseño específicos de una empresa. Por lo tanto la función objetivo se establece como:

$$\begin{aligned}
 \text{Min : } Cost(N_x, N_y, N_{rod}) = & (C_{cond} + C_{trench})L_{cond} + \\
 & + (C_{rod} + C_{drive})L_{rod} + \\
 & + (C_{connect} + C_{exoth})(N_{rod} + N_{exoth})
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Donde,

$$L_{cond} = (N_x + 1)L_x + (N_y + 1)L_y \tag{3.9}$$

$$L_{rod} = l_{rod}N_{rod} \tag{3.10}$$

$$N_{exoth} = (N_x + 1)(N_y + 1) \tag{3.11}$$

De esta manera, se definen los costos de una malla de una manera muy similar. En la ecuación (3.8), el primer término se encuentra asociado al conductor, insumos y montaje, mientras que las varillas y termofusiones en el segundo y tercer término, respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, existen restricciones adicionales determinadas por una empresa externa. Esto es importante considerarlo pues corresponde a un caso similar al objeto de estudio de esta memoria. Estas restricciones complementarias son:

$$\frac{L_x}{50ft} \leq N_x \leq \frac{L_x}{8,5ft} \quad (3.12)$$

$$\frac{L_y}{50ft} \leq N_y \leq \frac{L_y}{8,5ft} \quad (3.13)$$

Es decir, el número de subdivisiones totales en cada eje de la malla, se encuentran acotadas por un valor dependiente del largo de cada eje respectivo. Esto se realiza con el fin de limitar las soluciones posible a valores reales de ejecución en la obra.

De manera similar, e incluso más simple, es que en [11] y [12] se trabaja para minimizar los costos asociados a un proyecto de malla a tierra. Los aportes de cada trabajo mencionado, son las distintas metodologías de resolución utilizadas para una función objetivo y restricciones que claramente no son lineales.

Capítulo 4

Algoritmo Propuesto

El presente capítulo tiene por objetivo exhibir el algoritmo propuesto, comenzando con la presentación de la problemática, identificando la función objetivo y restricciones, y por último estableciendo el algoritmo de resolución.

4.1. Presentación del Problema

Se posee un área de cobertura de largo L_x y profundidad L_y , la cual está dispuesta para la instalación de una subestación y se requiere realizar un diseño preliminar de la malla de puesta a tierra. Gracias a los estudios previos del proyecto se poseen ciertos datos de la ubicación geográfica y eléctrica de la SE ¹, estos son:

- *Estudio de cortocircuito:* A partir de este documento es posible obtener el valor de corriente que deberá dispersar la malla de puesta a tierra (I_G).
- *Estudio de resistividad eléctrica del terreno:* El estudio debe permitir identificar el terreno como uno homogéneo o estratificado en más de una capa, además de entregar el valor numérico de las resistividades del terreno.

Como se mencionó previamente en el marco teórico, se requiere además del tiempo máximo de despeje de la falla, que generalmente está determinado por las protecciones

¹Sigla utilizada para subestación eléctrica.

de respaldo. Por otro lado, algunos documentos normativos [22] sugieren tiempos para la evaluación de los límites tolerables de tensión.

Ya con estos antecedentes es posible realizar un diseño previo de la malla de puesta a tierra para la subestación. Ahora bien, se desea que este diseño sea lo más óptimo en términos de costo pero que respete las limitaciones establecidas por la norma IEEE STD. 80TM. Por lo tanto, para construir y definir una función objetivo, se solicitó la información de costos a TRANSELEC S.A.

TRANSELEC S.A reconoce como principales costos de construcción en este tipo de proyectos, los siguientes aspectos:

- **Costos del conductor:** Se considera un conductor de cobre, típicamente un 4/0 AWG. Dentro de los costos está contabilizado el valor del material como la valorización de la instalación del mismo.
- **Costos de empalmes:** Las uniones o cruces existentes en una malla de puesta tierra se deben unir, y la tecnología usada hoy en día por TRANSELEC S.A es de termo-fusión. El costo asociado a los empalmes contempla los materiales utilizados (carga explosiva y moldes) además de la mano de obra requerida para su ejecución. Los costos se diferencian para empalmes con geometría X y T .
- **Costos de excavación:** Las trincheras excavadas para la instalación del conductor se asumen de un ancho de 1 [m]. Los costos contemplan la valorización de la excavación y relleno, posterior a la instalación de los conductores.
- **Costos de la gravilla:** Corresponden a la valorización del material de alta resistividad instalado en la parte superior del terreno, además están contemplados los costos asociados a la instalación de la gravilla.

Para definir la función objetivo, primero se requiere establecer una función de costos general que dependa de características constructivas descritas. Para ello se propone un modelo genérico de malla a tierra, expuesto en la Figura (4.1).

En la Figura (4.1) se aprecia una malla rectangular de largo L_x y L_y en los ejes x e y respectivamente y se encuentra enterrada a una profundidad $h[m]$, además posee un

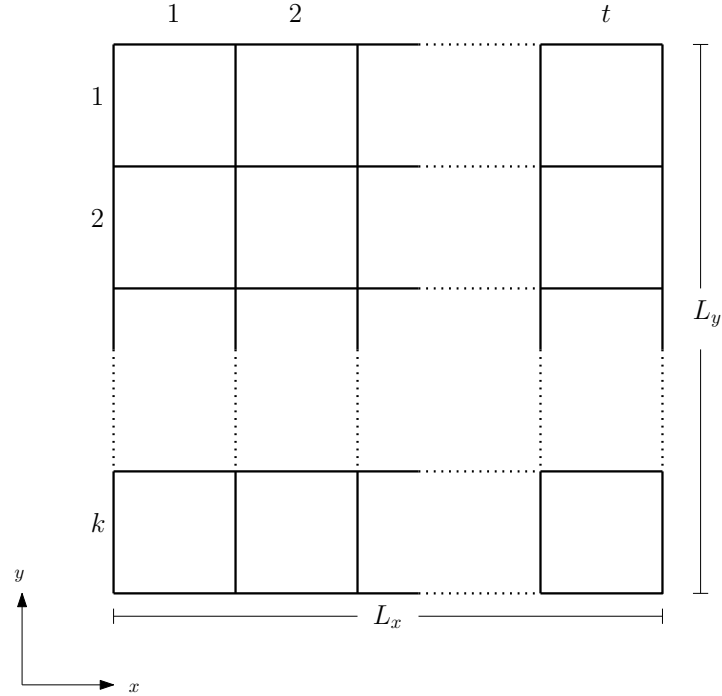


Figura 4.1: Malla base para la definición de parámetros de la función objetivo.

numero t de subdivisiones en el eje x ($N_x = t$) y k subdivisiones en el eje y ($N_y = k$). La malla posee una capa superior de gravilla de alta resistividad de espesor $h_s[m]$.

A partir de lo anterior se puede establecer que:

- Conductor total: $L_x \cdot (N_y + 1) + L_y \cdot (N_x + 1)[m]$
- Número de empales tipo X: $(N_x - 1) \cdot (N_y - 1)[-]$
- Número de empales tipo T: $2 \cdot (N_x + N_y - 2)[-]$
- Volumen de excavación: $(L_x \cdot (N_y + 1) + L_y \cdot (N_x + 1)) \cdot h \cdot 1[m^3]$
- Volumen de gravilla: $L_x \cdot L_y \cdot h_s[m^3]$

A partir de estas cantidades, y de la valorización entregada por TRANSELEC S.A, se determina una función de costos asociada a la malla de la Figura (4.1).

$$\begin{aligned}
 \text{Costos} = & (L_x \cdot (N_y + 1) + L_y \cdot (N_x + 1)) \cdot (C_{CUmat} + C_{CUinst}) + \\
 & + 2 \cdot (N_x + N_y - 2) \cdot (C_{Tmat} + C_{Tinst}) + \\
 & + \text{int} \left(\frac{2 \cdot (N_x + N_y - 2)}{30} \right) \cdot C_{Tmol} + \\
 & + (N_x - 1) \cdot (N_y - 1) \cdot (C_{Xmat} + C_{Xinst}) + \\
 & + \text{int} \left(\frac{(N_x - 1) \cdot (N_y - 1)}{30} \right) \cdot (C_{Xmol}) + \\
 & + (L_x L_y h_s) \cdot C_{GRmat} + \\
 & + (L_x(N_y + 1) + L_y(N_x + 1))h \cdot 1 \cdot (C_{Exc} + C_{Rell})
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Donde:

- C_{CUmat} : Costo de conductor de cobre, por $[m]$.
- C_{CUinst} : Costo de instalación de conductor, por $[m]$.
- C_{Tmat} : Costo de carga para un empalme tipo T.
- C_{Tinst} : Costo de ejecución de un empalme tipo T.
- C_{Tmol} : Costo de molde para un empalme tipo T.
- C_{Xmat} : Costo de carga para un empalme tipo X.
- C_{Xinst} : Costo de ejecución de un empalme tipo X.
- C_{Xmol} : Costo de molde para un empalme tipo X.
- C_{GRmat} : Costo de gravilla de alta resistividad, por $[m^3]$.
- C_{Exc} : Costo de excavación, por $[m^3]$.
- C_{Rell} : Costo de relleno de excavación, por $[m^3]$.

Además como se puede observar en la ecuación (4.1), existe una función interna llamada $\text{int}()$ que corresponde a la función parte entera. Esto se debe realizar pues

los moldes utilizados para la termofusión tienen un número limitado de usos, que se encuentra relacionado al desgaste en cada carga. En este caso se establece un promedio de 30 usos por molde.

4.2. Función Objetivo

A partir de la presentación del problema, se definen las cuatro variables que optimizarán el modelo de la malla de puesta a tierra.

- N_x : Número de subdivisiones en el eje x del área de cobertura de la malla de puesta a tierra.
- N_y : Número de subdivisiones en el eje y del área de cobertura de la malla de puesta a tierra.
- h : profundidad de enterramiento de la malla horizontal, en metros.
- h_s : Espesor de la gravilla de alta resistividad, en metros.

Por lo tanto, la función objetivo queda determinada a partir de la ecuación (4.1) y la Figura (4.1).

$$\begin{aligned}
 Min : F_{obj}(N_x, N_y, h, h_s) = & (L_x \cdot (N_y + 1) + L_y \cdot (N_x + 1)) \cdot (C_{CUmat} + C_{CUinst}) + \\
 & + 2 \cdot (N_x + N_y - 2) \cdot (C_{Tmat} + C_{Tinst}) + \\
 & + int \left(\frac{2 \cdot (N_x + N_y - 2)}{30} \right) \cdot C_{Tmol} + \\
 & + (N_x - 1) \cdot (N_y - 1) \cdot (C_{Xmat} + C_{Xinst}) + \\
 & + int \left(\frac{(N_x - 1) \cdot (N_y - 1)}{30} \right) \cdot C_{Xmol} + \\
 & + (L_x L_y h_s) \cdot C_{GRmat} + \\
 & + (L_x(N_y + 1) + L_y(N_x + 1))h \cdot 1 \cdot (C_{Exc} + C_{Rell})
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Por cláusulas de confidencialidad no es posible explicitar los valores de las constantes utilizadas en la función objetivo, por lo que a continuación se presentan los valores entregados por la empresa TRANSELEC S.A pero llevados a una base común, de tal manera de establecer la relación entre los costos de implementación de la malla.

Tabla 4.1: Costos de suministros y montaje de una malla de puesta a tierra. Costos presentados en una base común por confidencialidad.

Suministros		Costo [pu]
Cable Cu 4/0 AWG (C_{CUmat})	m	0,07
Molde empalme X 4/0 AWG (C_{Xmol})	c/u	1,00
Molde empalme T 4/0 AWG (C_{Tmol})	c/u	0,86
Carga 250 para empalme X (C_{Xmat})	c/u	0,14
Carga 150 para empalme T (C_{Tmat})	c/u	0,09
Montajes		-
Excavación de malla PAT (C_{Exc})	m^3	0,15
Relleno 100% material excavación (C_{Rell})	m^3	0,21
Montaje Cable Cu 4/0 AWG (C_{CUinst})	m	0,02
Ejecución carga X o T (C_{Tinst} y C_{Xinst})	c/u	0,04
Colocación de gravilla con aporte (C_{GRmat})	m^3	0,22

4.3. Restricciones

La optimización requiere de limitaciones que son intrínsecas del diseño de una malla de puesta a tierra, y que corresponden principalmente a los tensiones tolerables por una persona ubicada en las instalaciones de una S/E.

Las restricciones del problema de optimización están determinadas por la norma IEEE STD. 80TM, estas son:

$$\hat{E}_{Paso} \leq E_s \quad (4.3)$$

$$\hat{E}_{Contacto} \leq E_t \quad (4.4)$$

$$R_{Malla} \leq R_{gs} \quad (4.5)$$

Es decir:

- La máxima tensión de paso existente en la superficie del terreno de la malla, deber ser menor a la tensión tolerables entre pies (ecuación 2.2), definida por la norma [1].
- La máxima tensión de contacto presente en las instalaciones de una malla, deber ser menor a la tensión tolerables de contacto (ecuación 2.3), definida por la norma [1].
- El valor de diseño de resistencia de puesta a tierra debe ser menor a un valor establecido por el fabricante. Para TRANSELEC S.A, la resistencia de diseño debe ser menor o igual a 1 [Ohm] [22].

El valor de resistencia que se considera en [22] está determinado principalmente por el correcto funcionamiento del sistema de protecciones, es decir que el valor no afecte en mayor medida a las zonas de operación de los relés. Actualmente hoy los dispositivos de protección son mucho más flexibles que hace a algunos años, por lo tanto esta es una restricción que se puede adecuar a la realidad del proyecto. Esto va enfocado principalmente a terrenos de alta resistividad (desierto, roca) donde obtener un valor de resistencia de malla menor a 1 [Ohm] en algunos casos es impracticable.

4.4. Metodología de Resolución

El problema de optimización planteado previamente presenta diversos desafíos para su resolución, principalmente porque no es un problema de características lineales y debido a que algunas de sus variables son de tipo enteras.

La función objetivo presentada en la ecuación (4.2) tiene características no lineales, además, en esta misma está incluida una función parte entera relativa a los moldes utilizados para la termofusión. Así mismo, el cálculo de las restricciones posee una dependencia cuadrática con la distancia de enterramiento del conductor (ecuación 2.9). Estas condiciones hacen deducir que la concavidad del problema no es trivial y por lo tanto no es posible resolverlo de manera analítica.

Los algoritmos **heurísticos** son algoritmos aproximados de búsqueda del espacio solución que proporcionan buenas soluciones a un problema determinado [23]. Los algoritmos **metaheurísticos** son ‘algoritmos aproximados de propósito general consistentes en procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda [24].

En este contexto es que en el presente trabajo se propone **utilizar un algoritmo genético para la resolución** del problema planteado, pues representa una **metodología robusta** de solución y puede proporcionar buenas soluciones (no necesariamente óptimas) en un tiempo razonable.

4.4.1. Algoritmo Genético

Dentro de lo que se define como algoritmos metaheurísticos, existen los algoritmos genéticos (en adelante, AGs) que corresponden a métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización [25]. Su principio de funcionamiento está basado en la *selección natural*, proceso de evolución de los organismos vivos, concepto propuesto por Charles Darwin en el año 1859. Las bases de este tipo de algoritmos fueron presentados por Holland [26] en el 1975, y posteriormente desarrolladas por diversos autores.

A partir de una población inicial de individuos, que corresponden a las soluciones factibles del problema, se asigna a cada uno un valor de “sobrevivencia” que se encuentra directamente relacionado con la función objetivo. Este valor otorga las posibilidades al individuo para ser seleccionado como *padre* de la siguiente generación. De esta manera las siguientes generaciones estarán dotadas, en mayor medida, de las características o “genes” de aquellos padres que posean un mayor valor de “supervivencia”. Posterior a la selección de padres, se realiza la fase reproductiva en donde se realiza el proceso de *cruce* entre individuos padres y la posterior *mutación* de cada individuo. La Figura (4.2) representa el diagrama básico del proceso recién descrito.

A continuación se describen los aspectos básicos relativos a un AG.

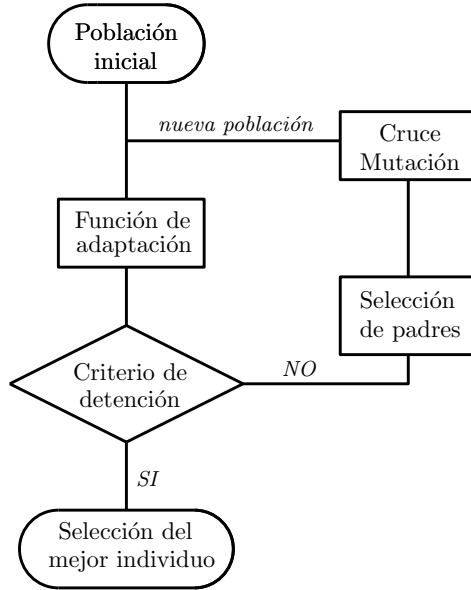


Figura 4.2: Diagrama de flujo de un AG simple.

4.4.1.1. Codificación

Una población inicial está representada por individuos (soluciones factibles del problema) que poseen ciertos genes que conforman su genotipo (variables del vector solución). Este conjunto de genes se suele llamar cromosoma y representa el fenotipo de un individuo particular. La representación de un cromosoma se realiza generalmente en formato binario, como se observa en la Figura (4.3).

$$F_{obj}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

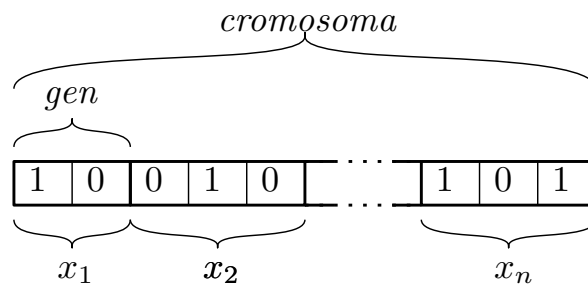


Figura 4.3: Codificación de un individuo en el AG.

En el caso particular de este problema, cada individuo está compuesto por las cuatro variables de la función objetivo expuesta en la ecuación (4.2), estas son; el número de subdivisiones en cada eje, la profundidad de enterramiento de la malla y el espesor de

la capa de gravilla de alta resistividad.

4.4.1.2. Función de Adaptación

La función de adaptación es particular de cada problema y debe ser creada a partir de las condiciones específicas de cada uno. En este caso la función de adaptación corresponde a la función objetivo establecida en la ecuación (4.2), y por lo tanto el valor de “sobrevivencia” de cada cromosoma corresponderá a un valor real de costo asociado a la construcción de una malla con las características de ese vector solución.

4.4.1.3. Cruce

A partir de los padres seleccionados se realiza un cruce de genotipos en un punto al azar del cromosoma (ver Figura 4.4). El cruce no se realiza necesariamente en todas las parejas de padres, por lo que existe una probabilidad asociada de éxito de cruce.

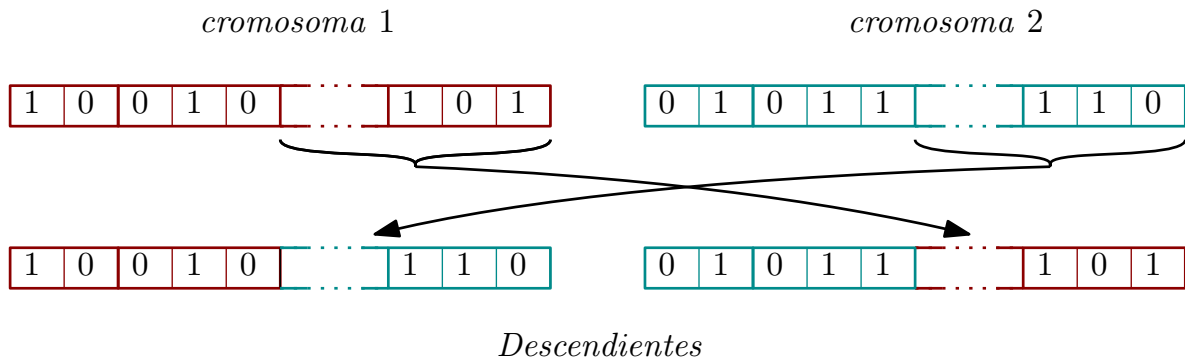


Figura 4.4: Cruce de dos individuos.

4.4.1.4. Mutación

La mutación es otra metodología para generar nuevos individuos, y corresponde a la alteración aleatoria de uno o más genes de un individuo (Figura 4.5).

4.4.1.5. Criterio de Detención

Existen diversos criterios para detener el algoritmo, los más conocidos y utilizados son:

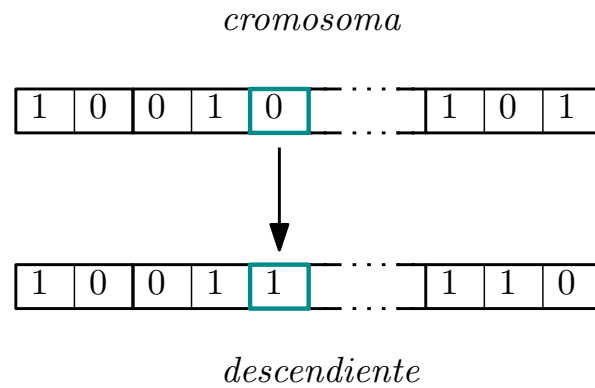


Figura 4.5: Mutación de un individuo.

- *Generaciones:* El algoritmo se detiene cuando el número de generaciones evaluadas alcanza un valor establecido previamente.
- *Límite de aptitud:* El algoritmo se detiene cuando el valor de “sobrevivencia” de algún individuo de la generación actual, alcanza un valor establecido previamente.
- *Estancamiento de generaciones:* El algoritmo se detiene cuando el cambio relativo promedio del valor de “sobrevivencia” en un número de generaciones preestablecida, es menor a un valor de tolerancia fijado.

Capítulo 5

Programación

El objetivo del presente capítulo es revisar las principales funciones y explicar con ello la lógica de trabajo del algoritmo. La herramienta es desarrollada en MATLAB[®] 2017b.

La programación de la herramienta es subdividida por funciones, dentro de las cuales existen tres categorías principales las cuales se presentan a continuación.

- **Estructura e interpretación de la malla:** Funciones enfocadas en el diseño geométrico de la malla, interpretación de elementos y nodos dentro de la estructura en conjunto con sus respectivas coordenadas en el espacio.
- **Cálculo de Resistencia y Potencial:** Dedicadas al cálculo del valor de resistencia de la malla y potencial eléctrico en la superficie generado por este.
- **Algoritmo Genético:** Funciones enfocadas en la optimización mediante el algoritmo representado en la Figura (4.2).

5.1. Estructura e Interpretación de la Malla

Como se mencionó anteriormente, la principal finalidad de estas funciones es crear la estructura de datos bajo la cual fuese posible obtener la información geométrica de la malla de puesta a tierra. El enfoque utilizado fue el de interpretar la malla como una matriz con nodos y elementos, donde cada uno de estos objetos se define como:

- **Nodo:** Unión de dos o más elementos de conductor en la malla.
- **Elemento:** Estructura de conductor que se encuentra entre dos nodos de malla.

Es decir, una malla de 2×2 divisiones, como la que se observa en la Figura (5.1), posee 9 nodos (*puntos azul oscuro*) y 12 elementos (*barras turquesas*).

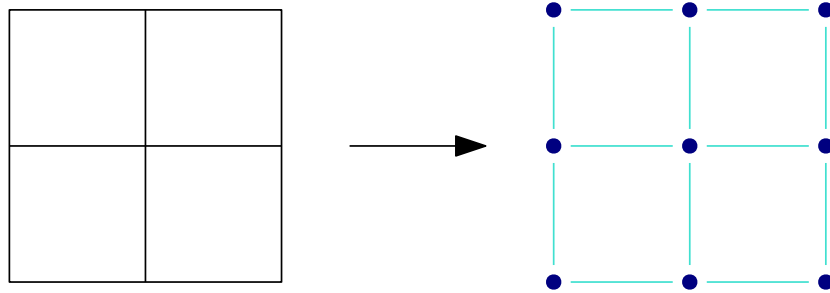


Figura 5.1: Ejemplo de interpretación de nodos y elementos en una malla de 2×2 divisiones, discretización por elemento igual a 1.

Además se establece un parámetro de precisión que se encuentra asociado al número de divisiones que posee un elemento en la malla. Cuando el parámetro **discretización por elemento** es igual a 1, entonces la interpretación de una malla se hace de la misma manera como se demuestra en la Figura (5.1). Al aumentar este valor (números enteros) la interpretación de la malla se hace más discreta, como se observa en al Figura (5.2).

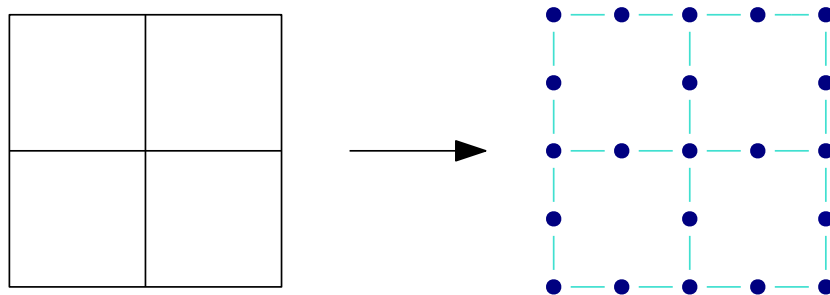


Figura 5.2: Ejemplo de interpretación de nodos y elementos en una malla de 2×2 divisiones, discretización por elemento igual a 2.

Como se puede observar en la Figura (5.2), la malla posee 21 nodos y 24 elementos. El aumento del valor de discretización conlleva un aumento directo del número de elementos y por lo tanto el número de cálculo en las posteriores funciones.

Las funciones programadas que permiten crear la estructura matricial de una malla de puesta a tierra, se describen a continuación.

- **Matrizbi.m**: A partir de parámetros de diseño de una malla de puesta a crear una matriz binaria que represente la malla. La representación binaria corresponde a 1 para nodos y 0 para los elementos.
- **Med.m**: A partir de parámetros de diseño de una malla de puesta a crear una matriz que represente la malla como un objeto de elementos finitos. A partir de la matriz binaria y las dimensiones de la malla, esta función entrega las coordenadas de los nodos ordenadas de manera matricial.
- **Elem.m**: En función de la matriz entregada por **Med.m** se obtienen las coordenadas del punto medio de cada elemento de la malla de puesta a tierra.
- **Mz1.m**: Crea una matriz con la dimensión de cada elemento de la malla. No todos los elementos de la malla poseen la misma dimensión, esto depende básicamente del número de subdivisiones, dimensiones generales de la malla y el valor de discretización utilizado.

El resultado final de estas funciones entrega un listado completo de las **coordenadas** de todos los **nodos y elementos** de la malla de puesta tierra, además de las **dimensiones** de estos últimos.

5.2. Cálculo de Resistencia y Potencial Eléctrico

A partir de la estructura de datos obtenida con las funciones antes presentadas, es posible realizar los cálculos necesarios para la obtención de la resistencia y potencial en la superficie del terreno.

Para el cálculo de resistencia es esencial recordar que este parámetro está compuesto principalmente por un valor de resistencia propio y uno mutuo, y ambos están determinados por la disposición geométrica de los elementos conductores. Si una malla posee n elementos entonces la matriz de resistencias tendrá una dimensión de $n \times n$. He aquí la importancia de considerar con un correcto criterio el valor de discretización utilizado.

Para el cálculo de resistencias se utilizaron las ecuaciones explicitadas en el Anexo (A.1) y (A.2).

A partir de la matriz de resistencias es posible obtener el valor de resistencia equivalente de la malla mediante la ecuación (2.15). Con la resistencia equivalente y la corriente derivada por la malla se deriva el valor de potencial equivalente de la misma (GPR). Como se mencionó previamente es posible suponer que el potencial es el mismo en todos los elementos de la malla, por lo tanto se obtiene la distribución de corriente en los distintos elementos, matriz necesaria para realizar los cálculo de potencial en la superficie.

Las funciones programadas para realizar el proceso antes descrito se muestran a continuación:

- **Resis_def.m**: Calcular el valor de resistencia de una malla de puesta a tierra, obtiene la matriz de resistencia de elementos. Las ecuaciones utilizadas son: (A.1), (A.3), (A.4) y (A.6).
- **Ai.m**: Sub-cálculo para obtener la resistencia mutua de dos elementos de la malla horizontal de puesta a tierra que sean paralelos. Ecuación (A.2).
- **Aii.m**: Sub-cálculo para obtener la resistencia mutua de dos elementos de la malla horizontal de puesta a tierra que sean perpendiculares. Ecuación (A.5).
- **I_Mall.m**: Obtener la matriz de distribución de corriente en los elementos de la malla, a partir del cálculo de la matriz de resistencia. Ecuación (2.12).
- **SurfP.m**: Calcula el potencial en la superficie del terreno, para una configuración cualquiera de malla de puesta a tierra, que no considere varillas verticales. Ecuaciones utilizadas (B.1), (B.3) y (B.4).
- **Gi.m**: Sub-cálculo para obtener el potencial en la superficie del terreno. Ecuación (B.2).

La metodología simplificada para la aplicación de las funciones y sus respectivas ecuaciones se observa en la Figura (5.3).

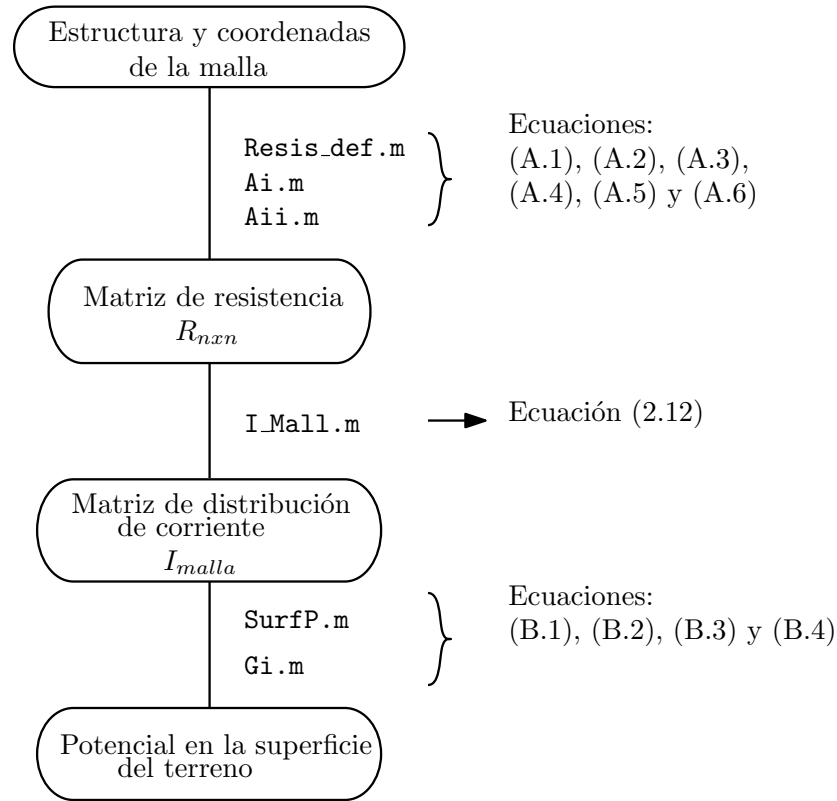


Figura 5.3: Metodología utilizada para la aplicación de las funciones programadas.

5.3. Algoritmo Genético

Estas funciones están enfocadas para realizar la optimización ya descrita en la metodología de resolución. Para utilizar el algoritmo genético se hizo uso de una herramienta adicional de MATLAB[®] 2017b que corresponde al paquete de funciones llamado “*Global Optimization Toolbox*”. Esta herramienta requiere definir una función objetivo y restricciones de ser necesarias, ambas son definidas a continuación:

- `Fobj.m`: Establece la función objetivo para el algoritmo genético. Ecuación (4.2).
- `simple_constraint.m`: Establece las restricciones para el algoritmo genético. Ecuación (4.4).

El objetivo de este capítulo era presentar una visión global de la programación de la herramienta, entregando las funciones básicas que se requirieron para su desarrollo. Todo lo mencionado a lo largo de este capítulo contempla lo necesario para desarrollar los alcances presentados en los objetivos.

Como trabajo adicional a los objetivos de esta memoria, se desarrollo una interfaz para el usuario que contempla tres grandes funciones para el uso práctico de la herramienta. Las funciones son:

- **Diseño Propio:** Permite diseñar y evaluar modelos rectangulares, con los parámetros que desee ingresar el usuario; dimensiones exteriores de la malla, número de subdivisiones en los distintos ejes, profundidad de enterramiento, reticulado equiespaciado o espaciado irregular y calibre de conductor.
- **Algoritmo Genético:** A partir de dimensiones externas de una malla rectangular, esta función puede encontrar el óptimo económico basado en las variables de entrada ingresadas por el usuario y por las restricciones de la norma IEEE STD. 80TM.
- **Evaluación de Diseño:** Función que permite evaluar diseños de malla de puesta a tierra dibujados en AutoCAD, esto se realiza a partir de un archivo .txt y una rutina LISP¹.

Las funciones mencionadas, su respectiva interfaz y un manual del usuario (Anexo D) es la herramienta final que se presenta en TRANSELEC S.A como desarrollo de la memoria.

¹Código de programación del software AUTOCAD.

Capítulo 6

Validación de herramienta

Antes de utilizar la herramienta programada en algún caso real es necesario corroborar que la metodología de cálculo esté bien programada, puesto que el conjunto de ecuaciones teóricas y la modelación matricial de las mallas es un sistema complejo. Esto se realiza mediante la creación de dos casos de comparación a partir de las memorias de cálculo de TRANSELEC S.A. Para esto se seleccionó la **subestación Entre Ríos**, de la cual actualmente existen dos documentos [28] [27] asociados a su malla de puesta a tierra.

La subestación Entre Ríos se encuentra ubicada a 100 kilómetros al sur-oriente de la ciudad de Concepción, en la octava región del Bío-Bío. La instalación está compuesta por tres patios principales; uno de 220 [kV], otro de 500 [kV] y el patio de auto-transformadores. El proceso de diseño de la malla de puesta a tierra estuvo a cargo de la empresa INPROLEC S.A y posteriormente se le solicitó a la empresa de ingeniería FERDINAND KAUSEL BOLT (en adelante, F.K.B) que realizara una revisión y optimización de la malla propuesta por INPROLEC. Ambas ingenierías se encuentran plasmadas en sus respectivas memorias de cálculo [28] [27] y cada una fue corroborada en base a los criterios estipulados por la norma IEEE STD. 80TM y los programas de cálculo respectivo.

A continuación se presentan los modelos diseñados por cada empresa y se evalúan en el programa bajo las condiciones que cada uno presenta en su memoria de cálculo. Los resultados obtenidos se comparan con los presentados en las memorias respectivas. El

objetivo de este proceso es validar la metodología de cálculo del programa, comparando los resultados entregados en las memorias de cálculo y aquellos que fueron obtenidos mediante otros programas del mercado (*benchamarking*).

6.1. INPROLEC S.A

INPROLEC S.A fue la empresa encargada de realizar la ingeniería en detalle de la malla de puesta a tierra de esta subestación. La metodología utilizada para el desarrollo del diseño fue basada en la norma IEEE STD. 80TM, y la herramienta para corroborar los cálculos fue el “software” ETAP 12.0.0.

Dentro de los estudios que realizó la empresa, se especifica el de resistividad de terreno. Los resultados obtenidos determinan caracterizar el terreno como una estructura de dos capas, una primera de 22.29 [Ωm] de 1.32 [m] de profundidad, y una segunda de 59.4 [Ωm] con una profundidad indefinida, pero suficientemente grande para considerarla como única.

Debido a las limitaciones de memoria de la herramienta (ETAP 12.0.0), se consideró de manera conservadora un terreno homogéneo de 60 [Ωm].

En resumen, y en base a los estudio realizados por la empresa [28], las consideraciones y características utilizadas en el diseño son:

- Profundidad de enterramiento: 0,6[m]
- Calibre del conductor: 4/0 AWG
- Corriente derivada por la malla: 41,460[kA]
- Resistividad del terreno: 60[Ωm]
- Despeje de falla en: 0,5[s]
- Resistividad gravilla: 3[k Ωm]
- Espesor gravilla: 0,10[m]

En base a lo anterior, INPROLEC S.A propone evaluar el modelo de la Figura (6.1).

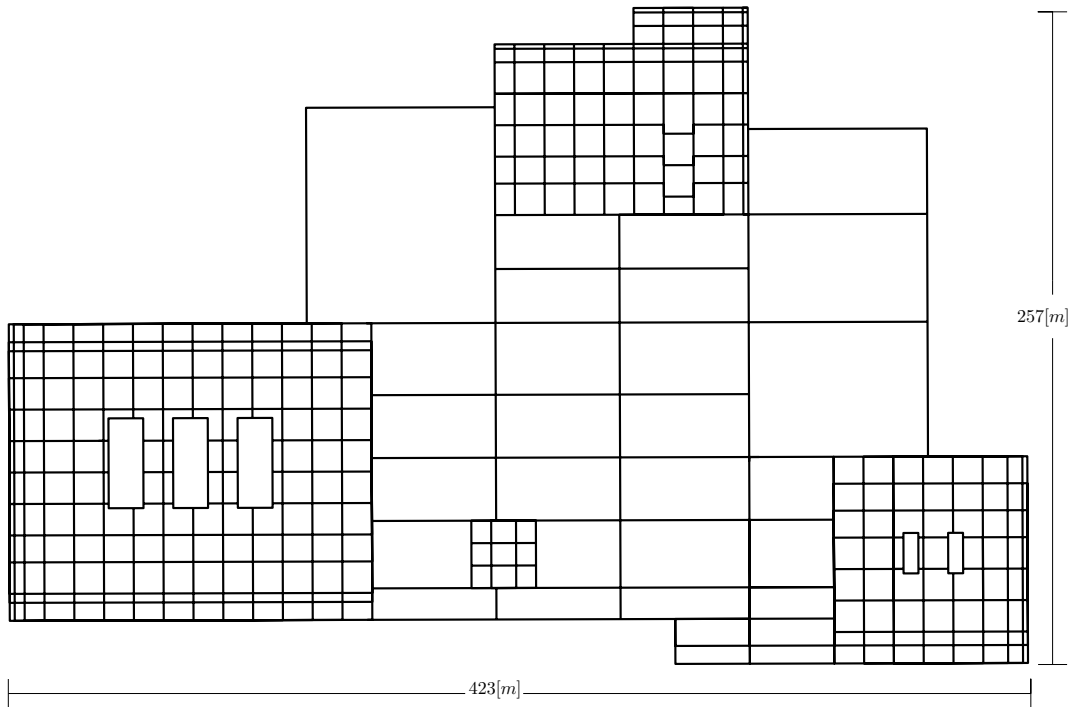


Figura 6.1: Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, diseño INPROLEC S.A.

Los resultados presentados en la memoria de cálculo carecen de precisión, puesto que se presentan gráficos en tres dimensiones que mediante la estratificación de colores sirven como corroboración para lo establecido por la norma. Por lo tanto los valores tensión de paso y contacto no serán comparados en este caso.

En particular la resistencia equivalente de la malla de puesta a tierra es un valor que se entrega de manera exacta. En la Tabla (6.1) se puede observar el valor entregado en la memoria de cálculo y el obtenido por la herramienta programada.

Tabla 6.1: Valores obtenidos para la Malla Completa de INPROLEC S.A

Medición	INPROLEC	Herramienta	Δ ¹
$R_{malla} [\Omega]$	0.1	0.0994	0.6 %

A pesar de que la malla posee una configuración compleja y extensa, la herramienta es capaz de calcular de manera correcta el valor de resistencia equivalente de la misma.

¹Diferencia porcentual, utilizando como base el resultado de la herramienta.

6.2. Ferdinand Kausel Bolt

Durante el desarrollo de la ingeniería de la malla de puesta a tierra de la subestación Entre Ríos, se le solicitó a F.K.B que realizará una optimización del diseño presentado por INPROLEC S.A con el objetivo de disminuir, de ser posible, los costos asociados a su construcción.

En base a los requerimientos hechos por S S.A, F.K.B realiza modificaciones al diseño de la malla, además de realizar consideraciones distintas respecto del terreno, corriente total dispersada y resistencia de la gravilla utilizada.

Las consideraciones y características del modelo son [27]:

- Profundidad de enterramiento: $0,3[m]$
- Calibre del conductor: 4/0 AWG
- Corriente derivada por la malla: $25,112[kA]$
- Resistividad del terreno: $100[\Omega m]$
- Despeje de falla en: $0,5[s]$
- Resistividad gravilla: $5[k\Omega m]$
- Espesor gravilla: $0,17[m]$

La corriente derivada por la malla presenta una gran disminución respecto a la utilizada por INPROLEC S.A puesto que F.K.B considera el factor de división de corriente S_f igual a 0,606 debido a la derivación por cables de guardia.

Otro factor importante en el diseño es que se considera una resistividad de la gravilla superficial igual a $5[k\Omega m]$. Mediante esta característica se logra aumentar los límites fijados por la norma, en comparación con el diseño de la otra empresa.

Con estas dos características se producen dos efectos importantes respecto al primer diseño presentado; se reducen las exigencias debido a la disminución de la corriente derivada, y se incrementan los límites establecidos por la norma al aumentar la resistencia

de contacto con el suelo. En base a esto es que F.K.B propone el modelo presentado en la Figura (6.2).

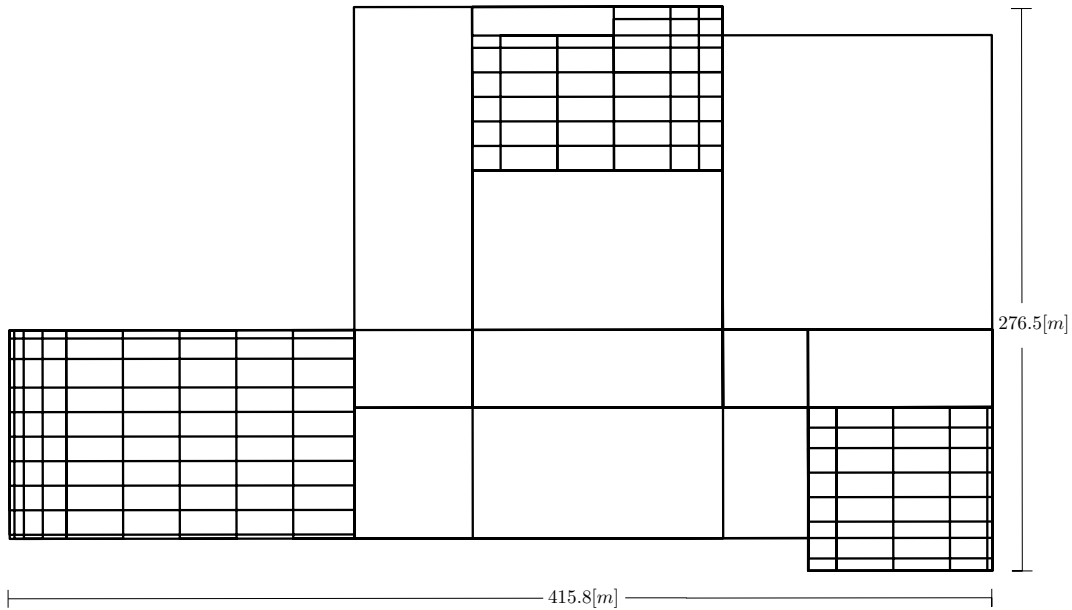


Figura 6.2: Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, diseño F.K.B.

Para la comparación de resultados obtenidos se subdivide el análisis para los distintos patios de la subestación, es decir, se analizará en detalle las tensiones de contacto y resistencia equivalente de la malla, considerando solo el enmallado de un patio en particular y la malla de conexión entre los distintos patios. Esta metodología es la utilizada por F.K.B para la presentación de resultados.

Los resultados de tensión de contacto se presentan en la unidad $[V/kV]$ para homologar la presentación de resultados de la memoria de cálculo. Esto se hace dividiendo el valor teórico de la tensión de contacto en el valor de GPR, en $[kV]$, de la malla.

Patio 500 [kV]

Como se mencionó la malla a analizar contempla el enmallado del patio de 500 $[kV]$ y la malla de conexión entre los patios, como se observa en la Figura (6.3).

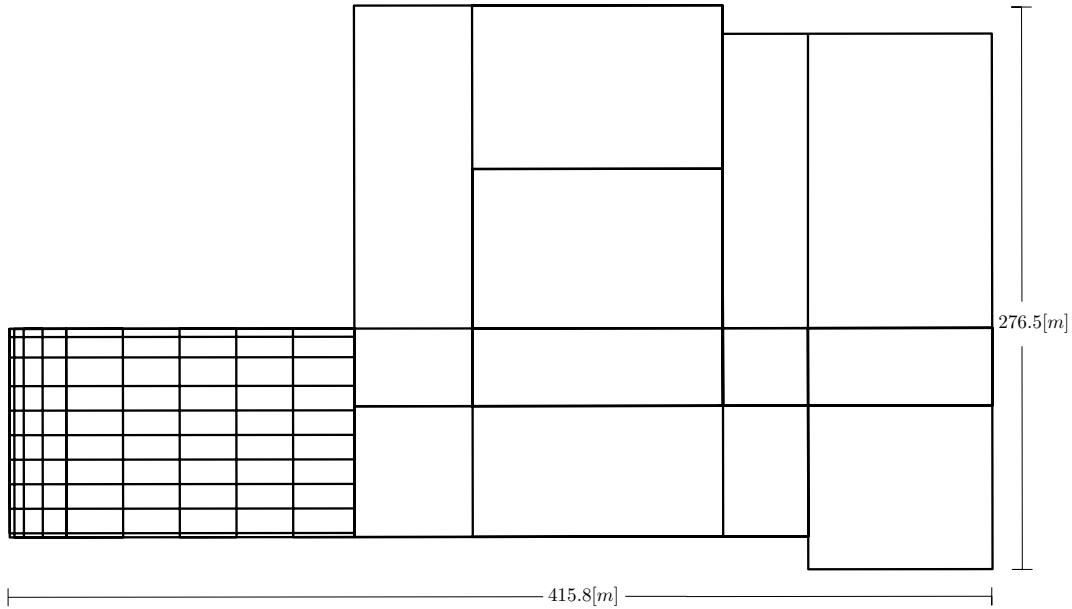


Figura 6.3: Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, considerando solo el patio de 500 [kV].

El perfil de tensiones de contacto en el patio de 500 [kV], obtenido a partir de la herramienta, se observa en la Figura (6.4).

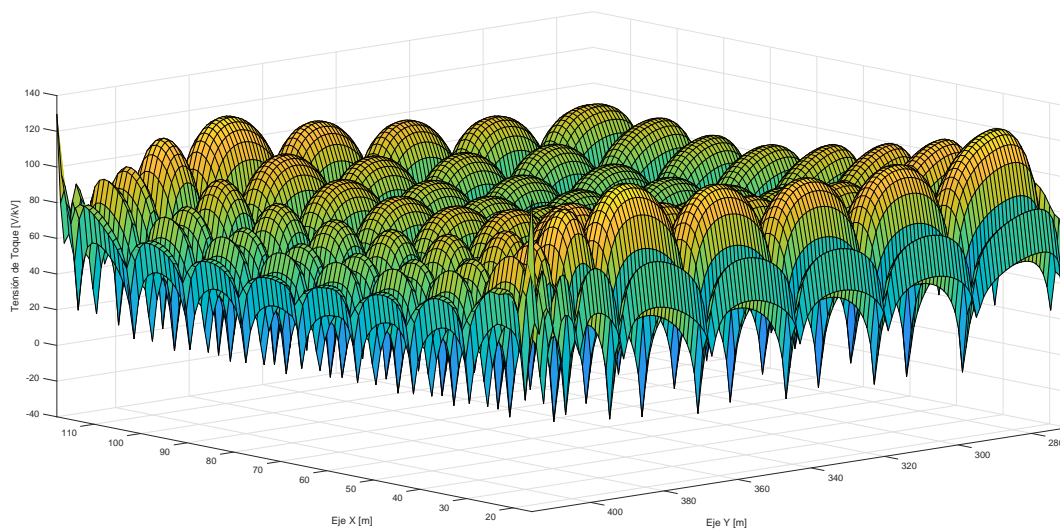


Figura 6.4: Tensiones de contacto en el patio de 500 [kV].

A partir de la herramienta y la memoria de cálculo de F.K.B se presenta el resumen de resultados del patio analizado en la Tabla (6.2).

²Diferencia porcentual, utilizando como base el resultado de la herramienta.

Tabla 6.2: Comparación de resultados entre software utilizado por F.K.B y la herramienta desarrollada en el patio de 500 [kV].

Patio	Medición	F.K.B	Herramienta	Δ^2
500 [kV]	R_{malla} [Ω]	0.175	0.177	1.12 %
	V_{malla} [V/kV]	126	124	1.6 %

Patio 220 [kV]

De manera similar al caso anterior se analiza la malla de la subestación pero considerando el enmallado del patio de 220 [kV] y las conexiones entre los distintos patios, como se observa en la Figura (6.5).

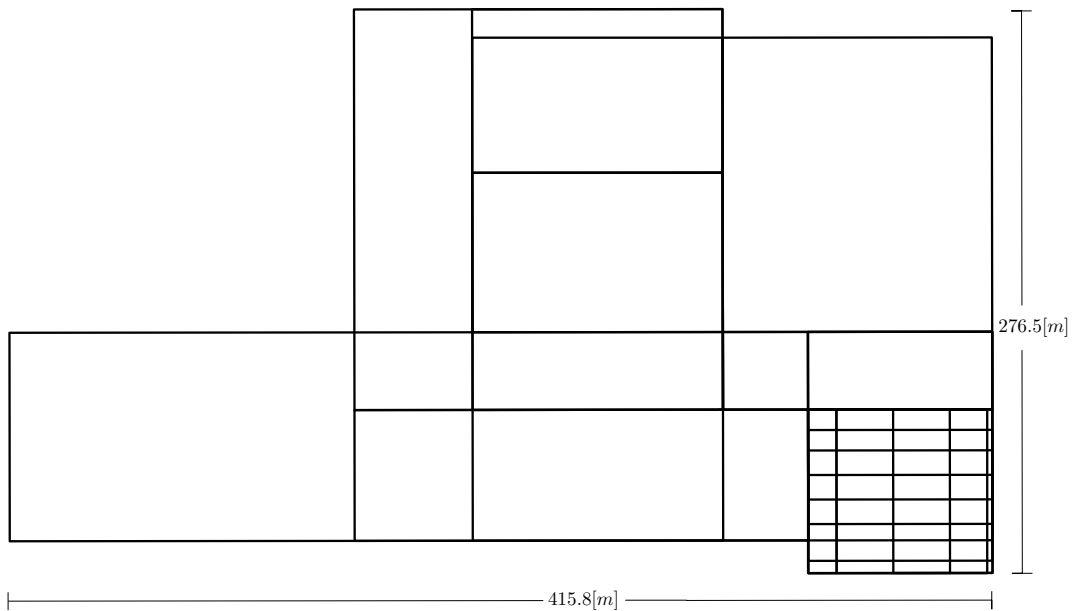


Figura 6.5: Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, considerando solo el patio de 220 [kV].

A partir de la Figura (6.6) se calculan las tensiones de contacto en la zona analizada y se obtiene el perfil presentado a continuación.

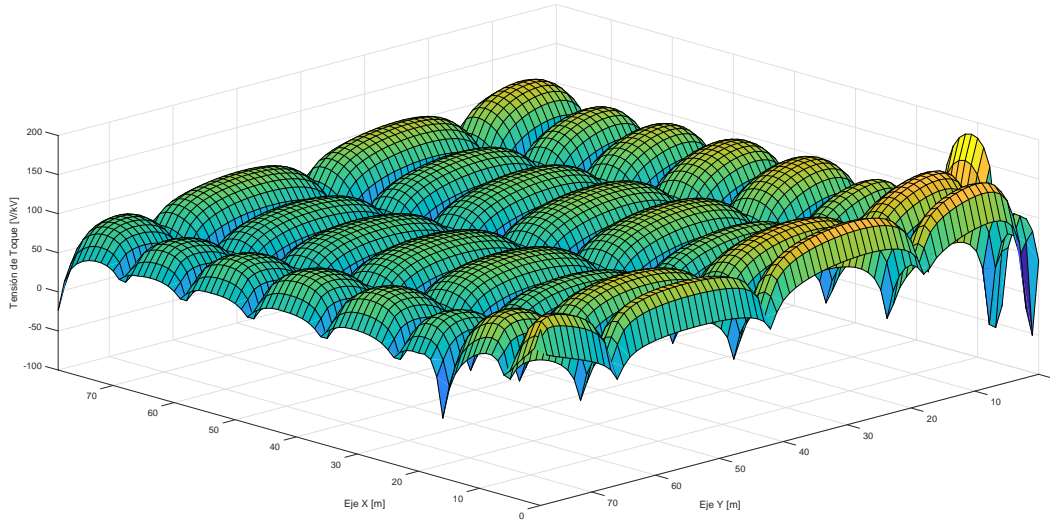


Figura 6.6: Tensiones de contacto en el patio de 220 [kV].

A partir de la distribuciones geométricas presentadas en las Figuras (6.5) y (6.6), se obtienen la resistencia de la malla y la tensión de malla respectivamente, donde esta última corresponde a la máxima tensión de contacto en el patio. El resumen de resultados y la comparación respectiva se presenta en la Tabla (6.3).

Tabla 6.3: Comparación de resultados entre software utilizado por F.K.B y la herramienta desarrollada en el patio de 220 [kV].

Patio	Medición	FKB	Herramienta	Δ^3
220 [kV]	R_{malla} [Ω]	0.183	0.187	2.14 %
	V_{malla} [V/kV]	139.25	156	10.73 %

Patio de Auto-transformadores

Por último se desarrolla el mismo análisis pero para el patio de auto-transformadores de la subestación. La malla analizada corresponde a la observada en la Figura (6.7).

³Diferencia porcentual, utilizando como base el resultado de la herramienta.

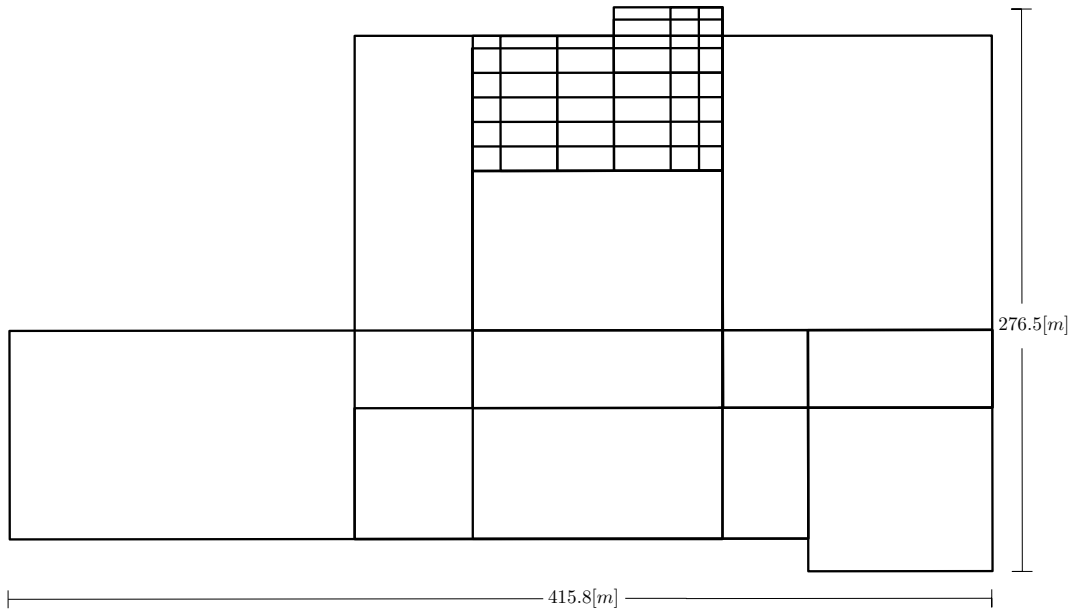


Figura 6.7: Malla de puesta a tierra Subestación Entre Ríos, considerando solo el patio de Auto-transformadores.

El perfil de tensiones obtenido en la herramienta fue:

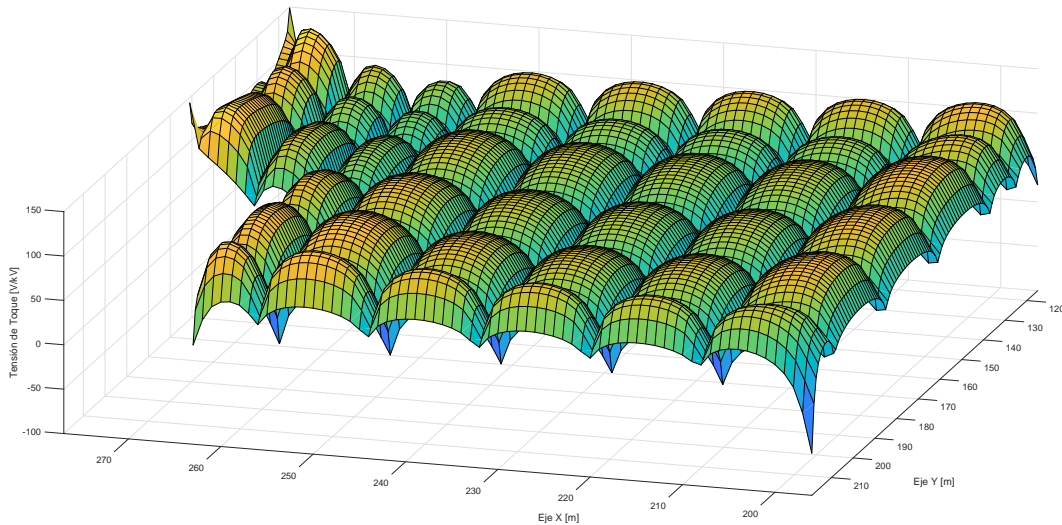


Figura 6.8: Tensiones de contacto en el patio de Auto-transformadores.

La resistencia y la tensión de malla, calculada a partir de la Figura 6.8, se expresan de manera comparativa con los resultados de la memoria de cálculo en la Tabla (6.4).

⁴Diferencia porcentual, utilizando como base el resultado de la herramienta.

Tabla 6.4: Comparación de resultados entre software utilizado por F.K.B y la herramienta desarrollada en el patio de auto-transformadores [kV].

Patio	Medición	FKB	Herramienta	Δ ⁴
Auto-TR	R_{malla} [Ω]	0.188	0.1883	0.16 %
	V_{malla} [V/kV]	132	134.6	1.93 %

Comentarios Generales

Los resultados observados en las Tablas (6.3), (6.2) y (6.4) demuestran que las diferencias porcentuales existentes entre los cálculos realizados por la herramienta y F.K.B son bajas. Lo que permite concluir que la herramienta realiza de manera correcta los cálculos teóricos estipulados en [2]. Esto también se ve corroborado por la mínima diferencia existente en el cálculo de resistencia de la malla de INPROLEC S.A (ver Tabla 6.1).

Se debe recordar que este proceso de validación de la herramienta se debe realizar por lo complejo del algoritmo a programar, es decir, no se está validando la precisión y teoría de las ecuaciones planteadas en [2], sino la correcta programación de las distintas funciones utilizadas. Por ello mismo no se requiere de una metodología más certera y normada para la validación de la herramienta.

Capítulo 7

Diseño Optimizado

Los diseños de la malla de puesta a tierra de la subestación Entre Ríos, que fueron presentados en el capítulo anterior, poseen diferencias considerables en torno a su geometría interna. Esto se debe principalmente a las consideraciones realizadas en la corriente de cortocircuito y la resistencia de la gravilla superior, a pesar de estas diferencias considerables ambos diseños cumplen las condiciones impuestas por la norma IEEE STD. 80TM. En la revisión de las memorias de cálculo de ambos diseños, es posible observar consideraciones conservadoras para la selección de terreno y para los factores de seguridad presentes en las tensiones de contacto y paso, considerando además que el proceso de diseño presentado en la norma, ya posee numerosos criterios conservadores.

A lo largo de este capítulo se realizará un diseño propio de la subestación Entre Ríos, basado en los resultados entregados por el algoritmo metaheurístico de la optimización de costos de construcción de una malla.

Como se mencionó previamente, la herramienta se encuentra desarrollada para realizar diseños cuadrados o rectangulares de mallas de puesta a tierra, y como es claro a partir de las mallas presentadas en el capítulo anterior, la subestación Entre Ríos no posee estas características. Por lo tanto, a continuación se propone un procedimiento para el diseño de malla de puesta a tierra que no posean geometrías cuadradas y rectangulares.

7.1. Procedimiento Propuesto

Para desarrollar la malla de la subestación Entre Ríos se realizarán los diseños individuales de cada patio, los que poseen la geometría adecuada para utilizar la herramienta, para posteriormente unirlos de manera manual respetando las dimensiones originales de la subestación. Es decir, se subdividirá el valor de corriente total disipada, y mediante el algoritmo genético se diseñaran los tres patios principales.

El principal problema que se presenta al momento de realizar los diseños de manera individual es que no se conoce con precisión cuál es el valor de corriente disipada en cada una de ellas. La dificultad de realizar esta estimación se encuentra en el hecho de que la corriente es disipada de acuerdo a la resistencia de los elementos presentes en la malla, y por lo tanto se encuentra directamente relacionada con la geometría de la misma.

Esta situación se repite de la misma manera para cuando se desea realizar una ampliación de la subestación. Es decir, si la malla se encontraba diseñada para un cierto valor de cortocircuito, y con el tiempo este valor aumenta con la adición de paños y patios nuevos, entonces es necesario que la ampliaciones que se realicen sean capaces de disipar el valor adicional de corriente.

En base a la experiencia y el desarrollo de distintas mallas de puesta a tierra, es que se propone la siguiente metodología para el desarrollo de mallas complejas con la herramienta.

1. Separación de corriente total disipada en función del área de cobertura de los tres patios principales de la subestación.
2. Primero se utilizará la herramienta para diseñar el patio que posea mayor corriente de disipación. Este definirá, en base a la optimización, la profundidad de enterramiento de la malla (h) y el espesor de la gravilla de alta resistividad (h_s) para la malla completa de la subestación además del número de subdivisiones por lado.
3. Diseño del resto de los patios mediante la herramienta, pero con los parámetros

h y h_s como condiciones de entrada. De esta manera el algoritmo solo optimizará el número de subdivisiones por lado de la malla (N_x y N_y).

4. Unión manual de las distintas mallas, respetando las dimensiones generales de la subestación.
5. Evaluación completa de la malla, bajo las condiciones exigidas por la norma IEEE Std. 80TM.

El procedimiento presentado es una propuesta para poder utilizar la herramienta para mallas que posean geometrías complejas, por lo tanto es necesario corroborar el diseño final completo de la subestación bajo la norma ya mencionada [1]. En caso de querer diseñar una malla rectangular o cuadrado este proceso no es requerido, pues la herramienta lo realiza de manera inmediata, entregando así un resultado ya validado.

7.2. Consideraciones del Modelo

Como se ha mencionado de manera exhaustiva, los principales factores que afectan el desempeño de una malla de puesta a tierra son la características del terreno y la corriente total dispersada por la misma. En conjunto con esto, la resistividad de la gravilla utilizada también es uno de los parámetros que define los límites de seguridad requeridos en la instalación. Realizar consideraciones adecuadas en estos parámetros es fundamental para diseñar de adecuada una malla de puesta a tierra.

En base a los documentos [27] y [28] entregados por TRANSELEC S.A es posible establecer las siguientes consideraciones del modelo:

- Calibre del conductor: 4/0 AWG
- Corriente total derivada por la malla: 41,460[kA]
- Resistividad del estrato superior: 22,9[Ωm]
- Resistividad del estrato inferior: 59,4[Ωm]

- Profundidad del primer estrato: $1,32[m]$
- Despeje de falla en: $0,5[s]$
- Resistividad gravilla: $5[k\Omega]$

La corriente total derivada por la malla se establece como el mayor valor de cortocircuito existente en la subestación, a este no se le aplica el factor de derivación por la presencia de cables de guardia. Esta decisión es conservadora en términos de seguridad y por lo tanto se justifica en sí misma para entregar un resultado más confiable para las instalaciones.

Una de las complejidades presentadas en [28] es la imposibilidad de realizar un modelo de terreno en dos capas, puesto que el “software” utilizado no poseía la capacidad de memoria para poder realizar un cálculo de tal magnitud. Aprovechando las ventajas de la herramienta desarrollada, es que se utiliza el modelo biestratificado del estudio realizado en [28] para poder modelar el terreno. Es importante destacar que un modelo biestratificado es una representación más cercana del terreno real que una homogénea, si es que este posee dicha estructura.

El diámetro del conductor utilizado y el tiempo de despeje de la falla son valores obtenidos a partir de las especificaciones técnicas generales de TRANSELEC S.A [22], para el diseño de subestaciones. La resistividad de la gravilla se define a partir de los valores establecidos por la norma IEEE STD. 80TM, *para una gravilla lavada* bajo lluvia.

Por último las dimensiones generales de la subestación se presentan a continuación, estos se obtienen a partir de [28] y son necesarios para poder realizar la metodología de diseño propuesta.

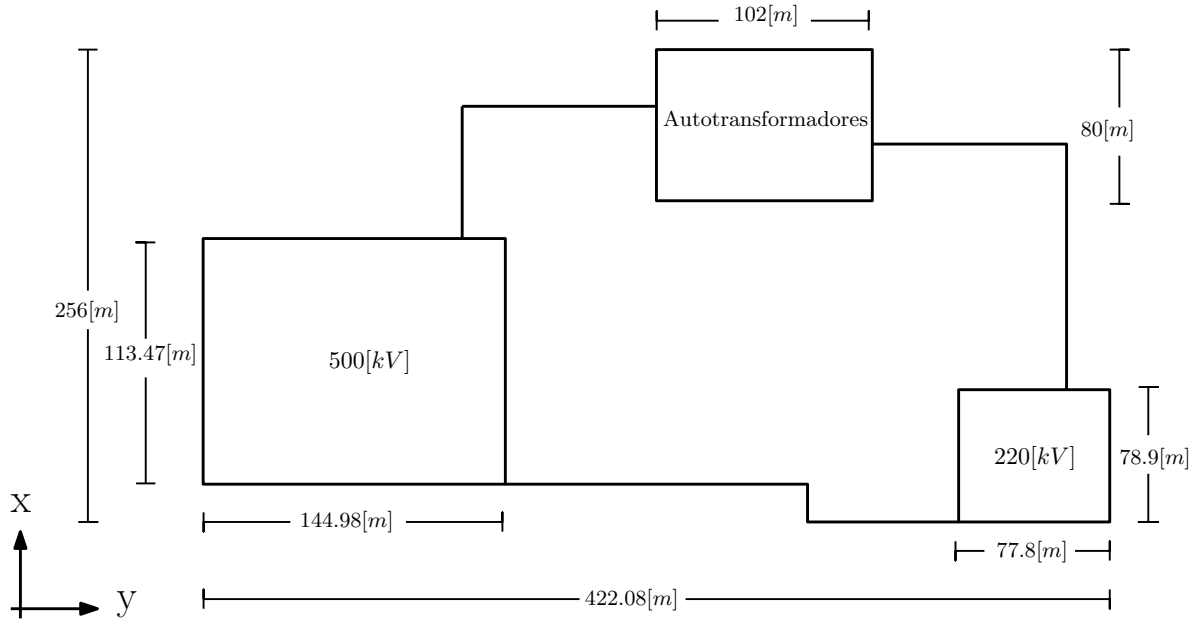


Figura 7.1: Dimensiones generales utilizadas para el diseño de la malla de puesta a tierra de la subestación Entre Ríos [27].

7.3. Optimización

A partir del procedimiento propuesto previamente se comienza el diseño de la malla de la subestación Entre Ríos. Considerando el área de cobertura de cada patio de la subestación (ver Figura 7.1) se subdivide la corriente total dispersada por la malla. Los resultados se expresan en la Tabla (7.1).

Tabla 7.1: Subdivisión de corriente total dispersada, proporcional al área de cobertura de cada patio.

	Área [m^2]	Corriente [kA]
Patio 500 [kV]	16450,88	22,18
Patio 220 [kV]	6138,42	8,28
Patio Autotransformadores	8160,00	11,00
Malla Completa		41,46

Dentro del área total de la malla no se considera el área de cobertura que entrega la malla ubicada entre los patios descritos, esto se considera así puesto que este sector no posee elementos o equipos que se encuentren aterrizados, lo que se traduce en un nulo riesgo por tensiones de contacto y por lo tanto una menor necesidad de densidad de malla en este sector. Es decir, no se considera como un sector que disperse una gran

cantidad de corriente. Este último criterio puede considerarse conservador pues la malla entre patios sí posee un valor de corriente dispersada, lo que disminuye en la realidad el valor asignado a cada patio en la Tabla (7.1).

A partir de las consideraciones del terreno, el valor de resistividad de la gravilla, y la subdivisión de la corriente ya es posible obtener un diseño particular por patio de la subestación.

7.3.1. Patio de 500 [kV]

Como se mencionó en el procedimiento propuesto, la primera malla a diseñar será la que posea una mayor corriente de dispersión según la Tabla (7.1). En este caso corresponde al patio de 500 [kV], y este dentro de la optimización, definirá 4 parámetros de diseño. Las variables de entrada del problema de optimización son las mencionadas en la ecuación (4.2) y corresponden a:

- Número de subdivisiones en el eje x (N_x)
- Número de subdivisiones en el eje y (N_y)
- Profundidad de enterramiento de la malla (h)
- Espesor de la gravilla de alta resistividad (h_s)

La referencia para el número de subdivisiones en cada eje se especifica en la Figura (7.1). La profundidad de enterramiento de la malla y el espesor de la gravilla, son variables que quedan definidas para el proceso de optimización de los otros patios, pues no es ideal que varíen a lo largo de la subestación. En la Figura (7.2) se observa la progresión de resultados de la optimización mediante el AG.

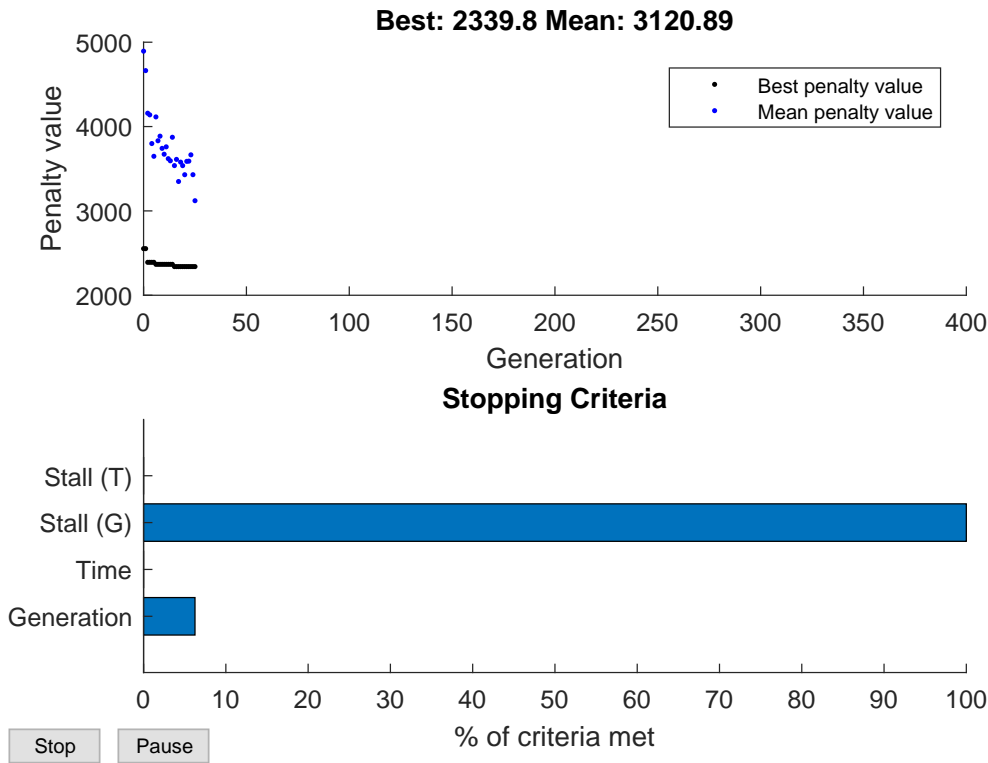


Figura 7.2: Progresión de resultados del algoritmo genético para el patio de 500 [kV] de la subestación.

Dentro de la información relevante que se obtiene de la Figura (7.2) es que el criterio por el cual se detuvo el algoritmo fue *estancamiento de generaciones*, puesto que se definió un máximo de 10 generaciones para este criterio (ver Sección 4.4.1.5).

El número total de generaciones requeridas para encontrar un valor óptimo fue de 25, y el resultado obtenido fue:

Tabla 7.2: Valores óptimos para el diseño del patio de 500 [kV] mediante el algoritmo genético.

Gen	Cromosoma			
	N_x [-]	N_y [-]	h [m]	h_s [m]
Valor	1	7	0,3	0,08

Para los siguientes patios se desarrolla el mismo proceso pero considerando solo, como variables de entrada del problema, el número de subdivisiones por eje.

7.3.2. Patio de 220 [kV]

Los resultados obtenidos por el algoritmo genético, en un total de 11 generaciones de los individuos se muestran en la Figura (7.3). Nuevamente el criterio de detención fue *estancamiento de generaciones*.

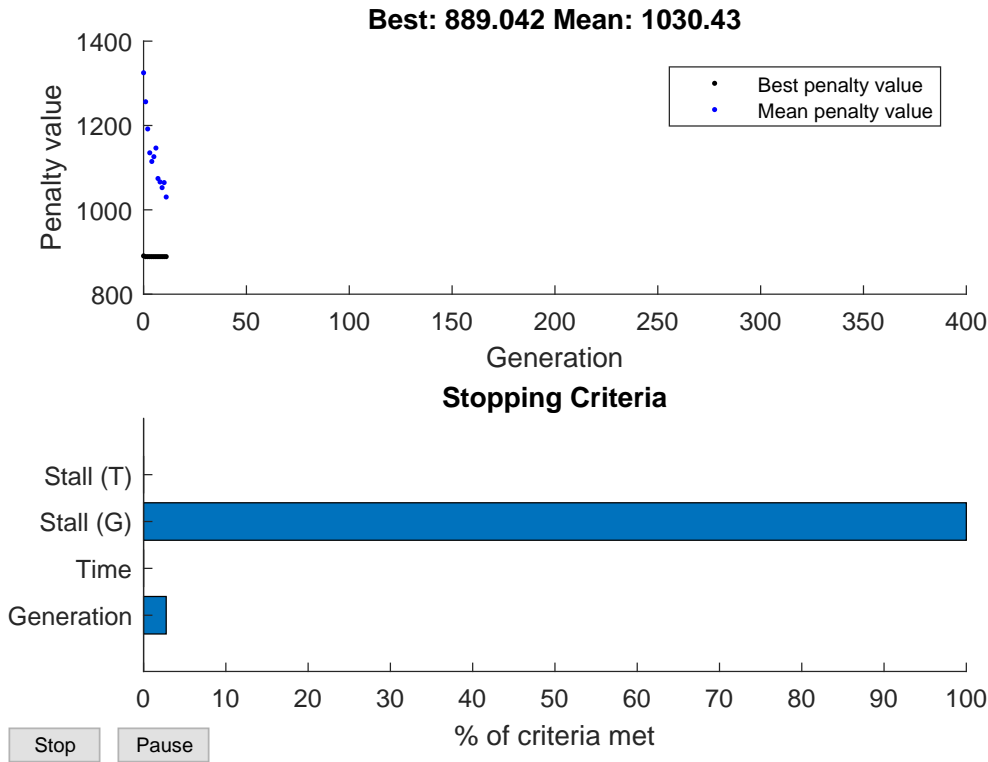


Figura 7.3: Progresión de resultados del algoritmo genético para el patio de 220 [kV] de la subestación.

El valor óptimo de divisiones obtenido se muestra en la Tabla (7.3).

Tabla 7.3: Valores óptimos para el diseño del patio de 220 [kV] mediante el algoritmo genético.

	Cromosoma	
Gen	N_x [-]	N_y [-]
Valor	3	1

7.3.3. Patio de Autotransformadores

Para el patio de autotransformadores se realiza la misma operación que en el caso anterior, pero con el valor de corriente dispersada respectivo. La progresión del algoritmo

mo genético se muestra en la Tabla (7.4).

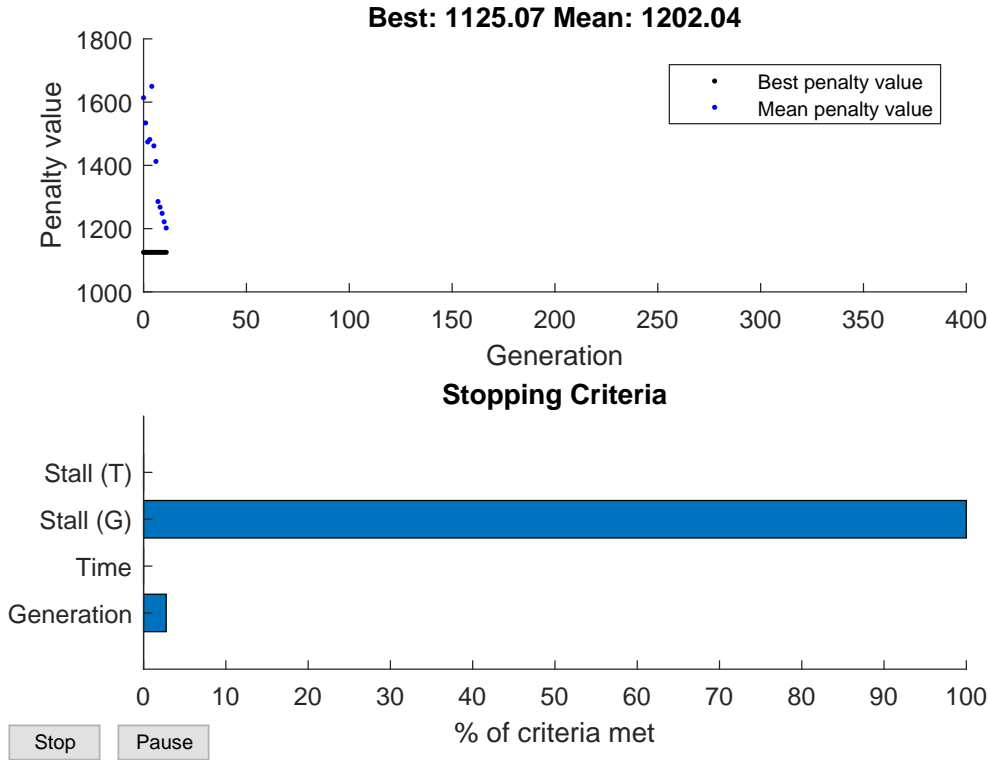


Figura 7.4: Progresión de resultados del algoritmo genético para el patio de autotransformadores de la subestación.

El valor óptimo de divisiones obtenido se muestra en la Tabla (7.4).

Tabla 7.4: Valores óptimos para el diseño del patio de autotransformadores [kV] mediante el algoritmo genético.

Gen	Cromosoma	
	N_x [-]	N_y [-]
Valor	3	1

Con estos resultados es posible construir la malla por patio, y obtener así, la malla completa de la subestación Entre Ríos.

7.4. Diseño Final

En base a los resultados obtenidos es posible construir el diseño de la malla para la subestación Entre Ríos. Para ello se utilizan las medidas generales establecidas en

la Figura (7.1) y se realiza el enmallado para cada patio particular en función de los resultados, considerando una división equidistante entre conductores. De esta manera el diseño obtenido es el que se muestra en la Figura (7.5).

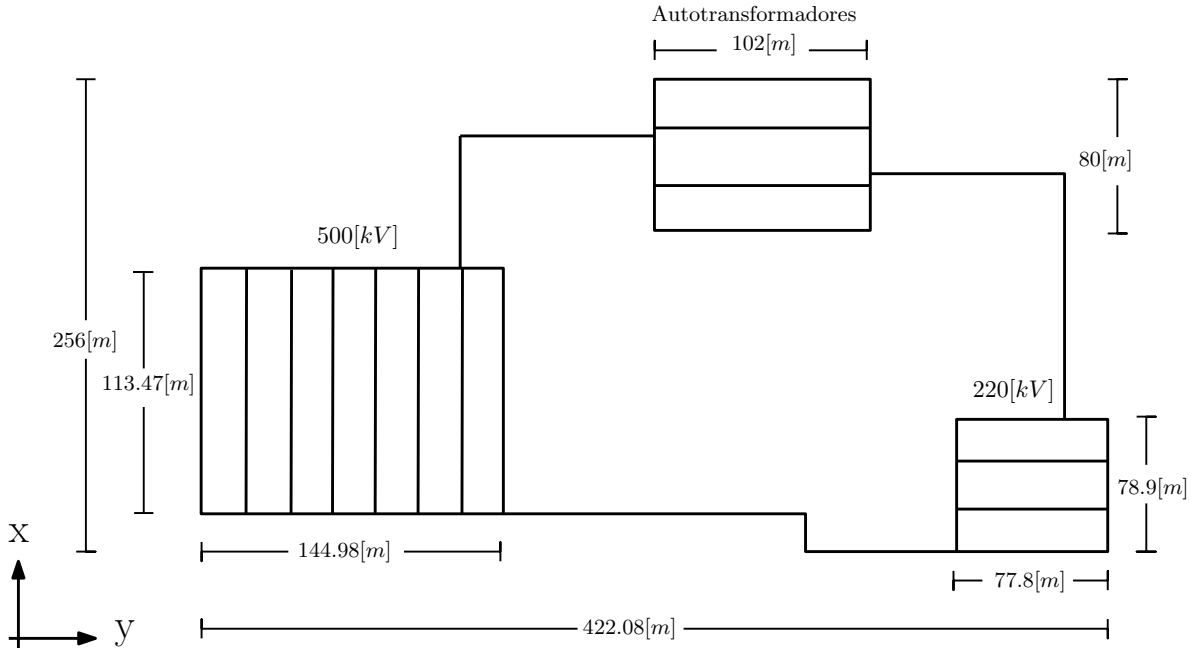


Figura 7.5: Diseño de la malla de puesta a tierra de la subestación Entre Ríos [27], sin reticulado de malla entre patios.

Con solo la dimensiones de la malla y la profundidad a la que se encuentra enterrada, es posible calcular la resistencia equivalente de este sistema de puesta a tierra en base a la ecuaciones del Anexo (A.1). Por lo tanto, con las consideraciones iniciales realizadas, las dimensiones de la Figura (7.5) y la profundidad de enterramiento, se obtiene que la resistencia equivalente de la malla es:

$$R = 0,1011[\Omega] \tag{7.1}$$

Este valor se encuentra dentro de lo recomendado por la ETG de TRANSELEC S.A [22], por lo tanto en términos de la resistencia este diseño se encuentra avalado para su implementación.

Como se ha mencionado reiteradamente el espesor de la gravilla y su resistividad, definen en gran medida los límites que establece la norma para el desempeño de la malla

de puesta a tierra. Con los resultado obtenidos, y las consideraciones realizadas inicialmente, es posible calcular los valores límites para el diseño de esta malla considerando el factor de reducción de la capa superficial (C_s).

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} = 0,6416$$

Por lo tanto los valores límites de tensión de contacto y de paso son:

$$E_s = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} = 3321,19[V]$$

$$E_t = (1000 + 1,5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} = 953,51[V]$$

Ahora solo basta corroborar que, dispersando el valor total de corriente en el diseño de la Figura (7.5), no existan valores de tensión de contacto y paso superiores a los límites fijados por la norma. Para ello se evalúa la malla bajo las consideraciones iniciales del problema y con la profundidad de enterramiento obtenida en el primer proceso de optimización.

En la Figura (7.6) se puede observar el potencial obtenido en la superficie del terreno. La superficie de cálculo incluye 1 metro hacia el exterior a partir de la reja de la subestación, como se recomienda en [2].

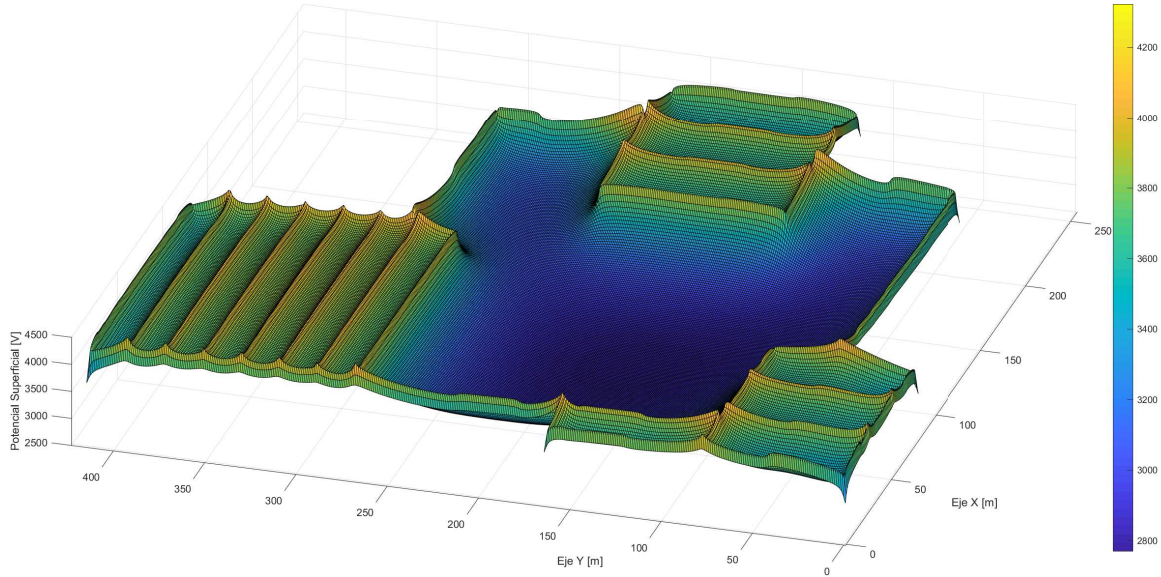


Figura 7.6: Potencial eléctrico en la superficie del terreno, respectivo a la malla de la Figura (7.5) y una dispersión total de corriente igual a $41,460[kA]$.

A partir del resultado de la Figura (7.6) es posible extraer perfiles de contorno del potencial, a partir de los cuales es factible obtener la diferencia de potencial entre dos puntos separados a 1 metro de distancia, lo cual fue definido previamente como tensión de paso. En el Anexo C se explicitan los perfiles de contorno (ver Figura C.1 y C.2) del potencial en la superficie del terreno. La máxima tensión de paso encontrada fue de $301,872[V]$.

Con el valor GPR de la malla, es posible calcular la diferencia de potencial de contacto en todo el manto de la superficie del terreno. El valor de GPR es:

$$GPR = I \cdot R = 46460 \cdot 0,1011 = 4697,1[V]$$

Como se tienen todos los valores de potencial en la superficie, basta restar al valor de GPR el valor de potencial en la superficie de manera particular. De esta manera se obtiene la Figura (7.7), que representa todas las tensiones de contacto existentes en el área de cobertura de la malla.

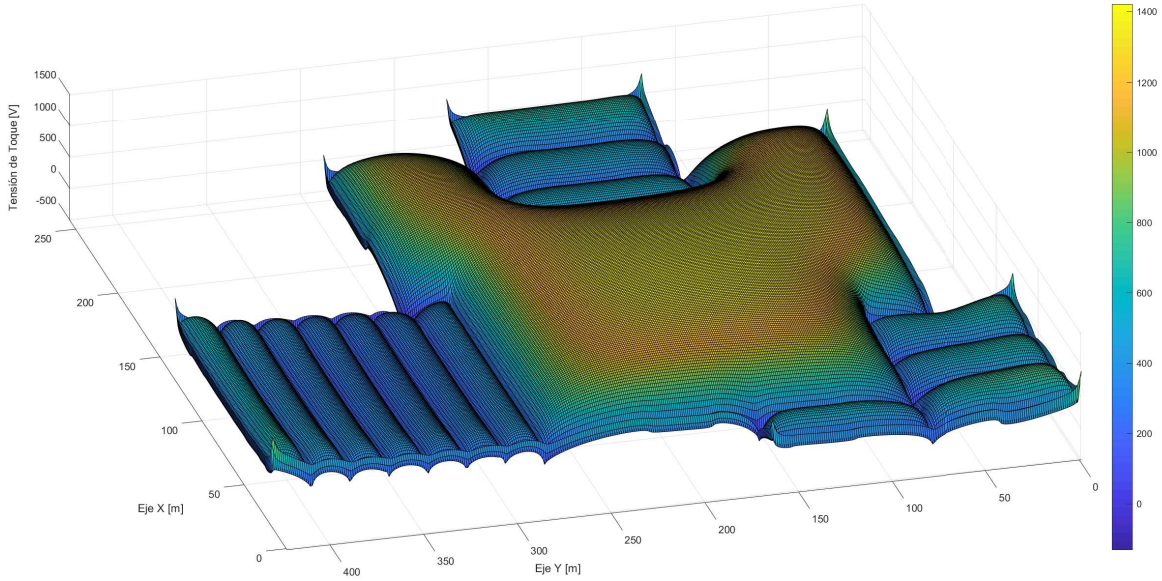


Figura 7.7: Tensiones de contacto obtenidas para la malla de la Figura (7.5) y una dispersión total de corriente igual a $41,460[kA]$.

Para términos prácticos es importante mencionar que no todos los valores de tensión deben ser considerados, esto se debe a que esta diferencia de potencial solo se presenta cuando existen estructuras, máquinas o equipos aterrizados directamente a la malla de puesta a tierra. Por lo tanto para obtener el máximo valor de tensión de contacto se consideran solo los lugares donde estos equipamientos existen, es decir, los patios donde se encuentran los equipos.

Tabla 7.5: Tensiones máximas de contacto en cada patio de la subestación Entre Ríos, para el diseño de malla de la Figura (7.5)

Patio	E_t [V]
500 [kV]	665
220 [kV]	779,9
Autotransformadores	695,6

En la Tabla (7.5) se presentan los valores máximos de tensiones de contacto de la malla evaluada, a partir de esta es posible deducir que la tensión de malla es de $779,9[V]$.

Los resultados obtenidos en comparación con los límites establecidos por norma internacional, se presentan en la Tabla (7.6). De esta manera se concluye que la malla es válida según la norma IEEE STD. 80TM, y que la metodología propuesta es útil y

Tabla 7.6: Resumen comparativo de; valores medidos en la subestación y límites establecidos por la norma IEEE STD. 80TM, según las consideraciones constructivas de la malla de puesta a tierra.

	Subestación Entre Ríos	Norma IEEE STD. 80 TM
Resistencia [Ω]	0,1011	0,5
Tensión de Malla [V]	779,9	953,51
Tensión de Paso [V]	301,872	3321,19

efectiva para este caso en particular de malla de puesta a tierra.

En términos de costos, todos los diseños fueron evaluados en la función objetivo presentada en la ecuación (4.2). El primer y último término fue remplazado por el largo total de conductor utilizado por los respectivos costos de conductor y excavación, y además solo se considero gravilla para el área de cobertura de cada patio. Con estas consideraciones los costos asociados a cada malla se presentan en la Tabla (7.7).

Tabla 7.7: Costos totales de suministros y montajes de cada diseño, calculados a partir de la ecuación (4.2)

Diseño	Costo [pu]
Inprolec S.A	3682,56
Ferdinand Kausel Bolt	2541,86
Herramienta PAT	1129,60

Se observa una clara disminución de los costos totales para la implementación de la malla de puesta a tierra. Esto se debe principalmente a la disminución de; conductor total utilizado, número de empalmes en el diseño, reducción de la capa de gravilla y menor volumen de excavación debido a la menor profundidad de enterramiento de la malla. La justificación de las grandes variaciones en todos estos parámetros se detalla a continuación.

7.4.1. Análisis de los Resultados

Basta comparar el diseño de malla propuesto en la Figura (7.5), con las presentadas por la empresas de ingeniería (ver Figuras 6.1 y 6.2) para identificar notables diferencias a nivel de enmallado de la estructura. Por lo tanto, se hace imprescindible identificar las razones y consecuencias de esas diferencias.

Lo primero que debe quedar claro, es que el diseño que es resultado del proceso

de optimización es válido y no trasgrede en ningún sentido las recomendaciones de la norma internacional y los criterios técnicos de TRANSELEC S.A. Es claro que el nivel de enmallado de este diseño es menor que cualquier otro de los presentados por las empresas externas, y además utiliza conductores en una sola dirección para cada patio en particular. Esta gran diferencia se explica principalmente por dos aspectos constructivos y técnicos de la malla, que se detallan a continuación.

- La optimización del diseño se realiza en base a la minimización de costos de construcción y considerando las limitaciones técnicas, es decir, la integración de ciertos elementos en la malla también está determinado por su costo asociado. Considerando esto, y entendiendo que las uniones o intersecciones de los conductores están directamente asociadas a una termofusión (considerada en el función objetivo), es claro concluir que el algoritmo intente reducirlas para minimizar costos de la construcción.
- Por otro lado, esta el aspecto técnico de considerar solo conductores en una dirección de cada patio de la subestación. Este aspecto ya fue analizado en [2] y está directamente relacionado con la restricción de tensión de malla (E_t).

En la Figura (7.8) se observan cuatro diseños de malla de puesta a tierra, sometidos a las mismas condiciones de terreno y cortocircuito. Las dimensiones exteriores de cada malla son las mismas entre sí. En cada una se identifica el valor (base común) y ubicación de la tensión de malla (máxima tensión de contacto).

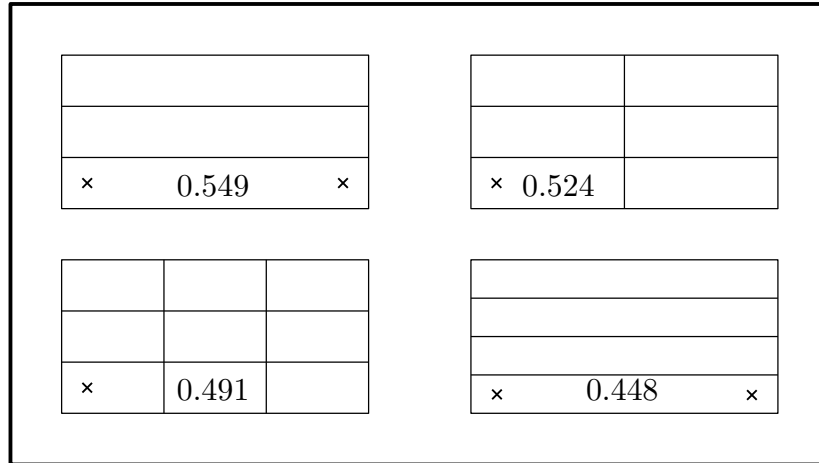


Figura 7.8: Tensiones de malla, para un terreno homogéneo

Se observa notoriamente que la adición de conductores perpendiculares o paralelos a la disposición inicial (esq. superior izq.), aportan a la reducción de la tensión de malla. Pero comparativamente el conductor paralelo lo hace en mayor medida.

Por lo tanto, en términos de reducción de la tensión de malla de un diseño de malla de puesta a tierra, es más efectivo hacerlo mediante la adición de conductores paralelos entre sí. **Las conclusiones aquí descritas deben ser analizadas para cada caso en particular de proyectos de malla de puesta a tierra.**

Considerando estos dos aspectos, es lógico concluir entonces que el algoritmo en su búsqueda de soluciones encuentre que las más económicas y que cumplan las restricciones técnicas son aquellas que presentan subdivisiones en una sola dirección, puesto que reducen en mayor medida la tensión de malla y por consecuencia reducen el número de termofusiones necesarias. Esto se observa claramente en los costos totales presentados en la Tabla 7.7, donde el diseño final presenta un valor menor al 50% de los otros diseños.

En términos generales el diseño obtenido de la optimización propuesta es un excelente punto de inicio para la ingeniería de detalles de la malla de puesta a tierra de la subestación, esto se debe principalmente a que cumple los requerimientos de la norma IEEE STD. 80TM y posee un costo de implementación considerablemente menor en comparación con los otros diseños expuestos. El hecho de que sea un buen punto de

inicio se debe a que la consideraciones del modelo no incluyen la disposición de equipos, lo que generalmente produce modificaciones en la malla por la profundidad de enterramiento de los cimiento de cada equipo. Además es necesario considerar que la adición de cualquier elemento conductor en la malla, de tal manera de enmallar más ciertos sectores de la subestación, solo producirán una mejora en el desempeño general de esta.

Capítulo 8

Conclusiones

La optimización de un diseño de una malla de puesta a tierra es un trabajo engorroso si se desea realizar una generalización de este proceso. Esto se debe principalmente a que todas las ecuaciones que se encuentran asociadas a su desempeño, son de carácter no-lineal. Además son numerosas las variables que influyen en la ejecución, por lo tanto, es necesario acotar el problema a aquellas tengan una transcendencia fundamental.

La representación matricial utilizada para la codificación del algoritmo fue acertada para el desarrollo de los algoritmos, puesto que es una metodología que permite acceder y almacenar de manera ordenada a toda la información geométrica y eléctrica de la malla de puesta a tierra. La dificultad de esta interpretación de datos es que requiere de extensos volúmenes de memoria, pues cada punto en el plano cartesiano es representado por un elemento de la matriz.

Se valida la programación de los cálculos teóricos y el registro mediante matrices, comparando los resultados con *softwares* de empresas expertas en el área.

El uso de algoritmos genéticos es adecuado para un problema de esta complejidad, pues es una optimización robusta que busca soluciones en un amplio espectro, y el diseño de mallas de puesta a tierra posee un vasto número de combinaciones posibles (según como se presenta el problema en esta memoria). El hecho de que evalúe grandes volúmenes de información también es un factor que se debe considerar, pues los tiempos de computación pueden ser extremadamente extensos. Pero considerando que el diseño de una malla debe realizarse una sola vez, y después someterse a modificaciones menores,

entonces aún es posible asumir este factor dentro del proceso.

Los resultados obtenidos a partir de la optimización lograron determinar que, los diseños tradicionales de mallas de puesta a tierra no necesariamente son, en términos económicos y técnicos, los más adecuados. La mejora en el desempeño de una malla de puesta a tierra es mayor cuando se incluyen conductores paralelos entre sí, siendo esto último, ningún tipo de impedimento técnico para la ejecución de diseños con solo conductores paralelos. Es más, el hecho de disminuir el número de intersecciones de conductor en la malla, reduce el número de termofusiones y por consecuencia el costo de la malla. El diseño final de la SE Entre Ríos, que es resultado del proceso de optimización, es válido y no trasgrede en ningún sentido las recomendaciones de la norma internacional IEEE STD. 80TM y los criterios técnicos de TRANSELEC S.A.

Las consideraciones realizadas para realizar un diseño de malla de puesta a tierra son fundamentales en el dimensionamiento de la misma. Es por ello que es necesario exigir y realizar estudios de calidad cuando se presenta un proyecto de este tipo. Principalmente porque el correcto cálculo de la corriente de cortocircuito y el factor de división de la misma, permiten no sobre dimensionar las solicitaciones de tensión de la malla. Caracterizar de manera correcta un terreno es fundamental para evaluar el desempeño del diseño.

La subdivisión de corriente según el área de cobertura de cada patio de la subestación resultó ser efectiva para el desarrollo de mallas de puesta a tierra, en subestaciones que poseen geometrías que no son rectangulares.

La herramienta es capaz de realizar diseños de malla de puesta a tierra que se encuentran regidos por las restricciones establecidas en la norma IEEE STD. 80TM, y corresponde un excelente punto de inicio para el desarrollo de la ingeniería de detalles del proyecto. Esto principalmente porque cualquier elemento conductor adicional que se incluya al diseño aportará de manera positiva al desempeño de la malla.

8.1. Trabajo Futuro

A lo largo del desarrollo de esta memoria quedaron algunas aristas del tema que pueden ser tratados para la continuación y mejoramiento de la herramienta programada:

- Incluir en la estructura del programa, la posibilidad de que el usuario agregue varillas verticales en los diseños. Para ellos es necesario desarrollar las ecuaciones teóricas de resistencia y potencial de un elemento conductor en un terreno biestratificado.
- Mejorar el desempeño del algoritmo mediante la modificación del procesamiento de datos, específicamente, paralelizar procesos de cálculo en MATLAB[®] para disminuir los extensos tiempos de computación.
- Incluir un nexo entre el “software” AUTOCAD y MATLAB para poder realizar evaluaciones de diseño de manera más eficiente.

Bibliografía

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std. 80TM - 2013.
- [2] P. Ortuondo, 'Manual para el proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra', 1995.
- [3] F. Dawalibi, 'Optimum design of substation ground in a two layer earth structure Part I: Analytical study', IEEE Trans. Power App., vol. PAS-94, no.2, Mar, 1975.
- [4] F. Dawalibi, 'Optimum design of substation ground in a two layer earth structure Part II: Comparison Between Theoretical and Experimental Results', IEEE Trans. Power App., vol. PAS-94, no.2, Mar, 1975.
- [5] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb 'Analysis of Grounding Systems', IEEE Trans. Power App., vol. PAS-100, no.3, Mar, 1981.
- [6] Robert J. Heppe, 'Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution', IEEE Trans. Power App., vol. PAS-98, no.6, Nov./Dec., 1979.
- [7] Y.L. Chow, M.M.A. Salama 'A Simplified Method for Calculating the Substation Grounding Grid Resistance', IEEE Trans. Power Del., May., 1994.
- [8] Floudas, C.A., Pardalos, P.M. 'Encyclopedia of Optimization', 2nd edn. Springer, Heidelberg, 2009.
- [9] Yang Yi-min, Peng Min-fang, Hong Hai-tao, 'Optimal design of ground grid based on genetic algorithm', 2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, 2009.

- [10] B. Alik, M. Tegar, A. Mekhald, 'Minimization of grounding system cost using PSO, GAO, and HPSGAO techniques', IEEE Trans. Power Del., vol. 30 no.6, pp. 2561-2569, June, 2015.
- [11] Chun-Yao Lee, Yi-Xing Shen, 'Optimal Planning of Ground Grid Based on Particle Swarm Algorithm', World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol:3, No:12, 2009.
- [12] Ahmed Z. Gabr, Ahmed A. Helal, Hussein E. Said 'Optimal Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm Technique', World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol:10, No:7, 2016.
- [13] Xuan Wu, Qianzhi Zhang, Jiahong He, 'Substation grounding system optimization with utilizing a novel MATLAB application', Engineering Conference (APPEEC), 2016 IEEE PES Asia-Pacific, Oct, 2016.
- [14] Ferdinand Kausel Bolt, 'Transelec S.A. Criterios Técnicos que aplican a una malla de puesta a tierra', Transelec – asesoría en puestas a tierra, Ago, 2016.
- [15] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, IEEE Std. 81TM - 2012.
- [16] Wenner, F. 'A method of measuring earth resistivity'. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Standards 1916.
- [17] Dalziel, C. F., and Lee, R. W., 'Reevaluation of lethal electric currents', IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA-4, no. 5, pp. 467-476, Oct. 1968.
- [18] Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, CNE, Enero. 2016
- [19] Mejía Villegas S.A, 'Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión', Segunda Edición, 2003.
- [20] IEC, Short-circuit currents in the three-phase a.c. systems, IEC TR 60909-1, July 2002.

- [21] El-Sayed M. El-Refaie, Said E. Elmasry, ‘Achievement of the best design for unequally spaced grounding grids’, Helwan university, Faculty of Engineering, Cairo 19177, Egypt, 2014.
- [22] Transelec, ‘Criterio de Diseño Eléctrico de Subestaciones’, ETG-A.1.01, 2013
- [23] Bianchi, Leonora; Marco Dorigo; Luca Maria Gambardella; Walter J. Gutjahr, ‘A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization’, Natural Computing: an international journal. September, 2008.
- [24] Francisco Herrera, ‘Introducción a los Algoritmos Metaheurísticos’, Dpto. Ciencias de la Computación e I.A, Universidad de Granada, España 2006.
- [25] Moujahid, Abdelmalik; Inza, Iñaki; Larrañaga, Pedro, ‘Tema 2. Algoritmos Genéticos’. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial , Universidad del País Vasco.
- [26] John H. Holland, ‘Adaptation in Natural and Artificial Systems’. MIT, 1975
- [27] Ferdinand Kausel Bolt, ‘Transelec – revisión diseño malla S/E Entre Ríos’. Noviembre, 2016.
- [28] INPROLEC, ‘MC MALLA PUESTA A TIERRA SUBTERRANEA’- STN4314-B. Octubre, 2016.

Anexos

Anexo A

Resistencia en un Terreno Biestratificado

A.1. Resistencia mutua entre dos conductores horizontales paralelos, enterrados a igual profundidad [2]

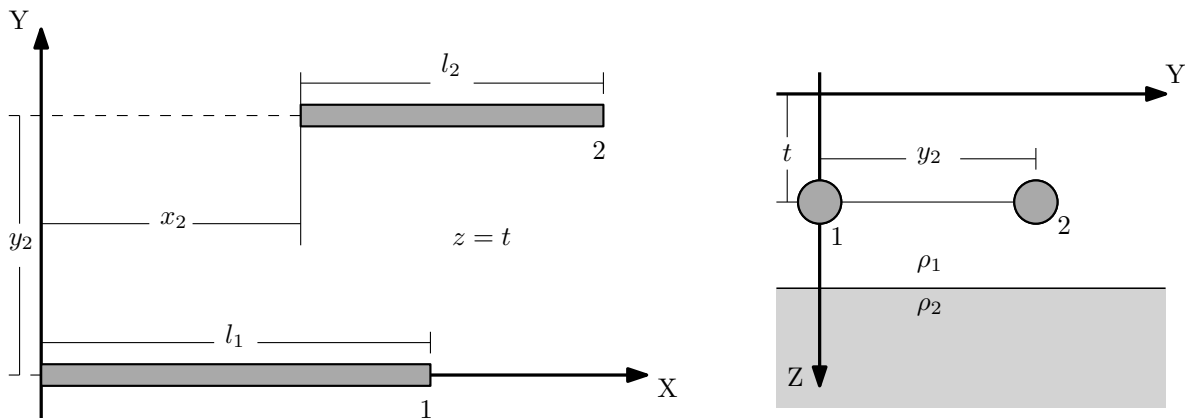


Figura A.1: 2 elementos horizontales paralelos, enterrados a igual profundidad t ($h > t$) [2].

Si **ambos conductores** se encuentran en el **estrato superior** ρ_1 , entonces:

$$R_{21} = \frac{\rho_1}{4\pi l_1 l_2} \left[A_1 + A_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (2A_3 + A_4 + A_5) \right] \quad (\text{A.1})$$

donde:

$$A_i = \left(u_1 a s h \frac{u_1}{P_i} - \sqrt{u_1^2 + P_i^2} \right) - \left(u_2 a s h \frac{u_2}{P_i} - \sqrt{u_2^2 + P_i^2} \right) + \\ + \left(u_3 a s h \frac{u_3}{P_i} - \sqrt{u_3^2 + P_i^2} \right) - \left(u_4 a s h \frac{u_4}{P_i} - \sqrt{u_4^2 + P_i^2} \right) \quad (\text{A.2})$$

con:

$$u_1 = l_2 + x_2; \quad u_2 = x_2; \quad u_3 = x_2 - l_1; \quad u_4 = l_2 - l_1 + x_2 \\ (\text{expresiones genéricas para (A.1) y (A.2)})$$

y:

$$P_1 = y_2; \quad P_2 = \sqrt{y_2^2 + (2t)^2}; \quad P_3 = \sqrt{y_2^2 + (2nh)^2}; \quad P_4 = \sqrt{y_2^2 + (2nh + 2t)^2}; \\ P_5 = \sqrt{y_2^2 + (2nh - 2t)^2}$$

Si **ambos conductores** se encuentran en el **estrato inferior** de resistividad ρ_2 , entonces:

$$R_{21} = \frac{\rho_2}{4\pi l_1 l_2} \left[A_1 + A_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (A_3 - A_4) \right] \quad (\text{A.3})$$

con:

$$P_1 = y_2; \quad P_2 = \sqrt{y_2^2 + (2t)^2}; \quad P_3 = \sqrt{y_2^2 + (2nh + 2t)^2}; \\ P_4 = \sqrt{y_2^2 + [2(n-2)h + 2t]^2}$$

El valor de **resistencia propia** R_{11} de un conductor horizontal recto se obtiene de (A.1) o (A.3), para $x_2 = 0$, $y_2 = a$ (radio del conductor).

A.2. Resistencia mutua entre dos conductores horizontales ortogonales entre sí, enterrados a igual profundidad [2]

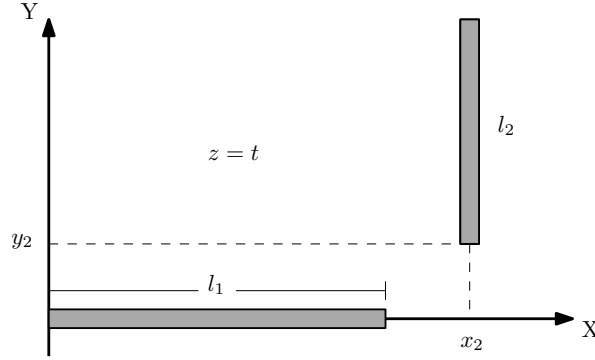


Figura A.2: 2 elementos horizontales ortogonales, enterrados a igual profundidad t ($h > t$) [2].

Si ambos conductores están ubicados en el estrato superior de resistividad ρ_1 :

$$R_{21} = \frac{\rho_1}{4\pi l_1 l_2} \left[A_1 + A_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (2A_3 + A_4 + A_5) \right] \quad (\text{A.4})$$

donde:

$$A_i = \left[\left[Vash \frac{U}{\sqrt{V^2 + Q_i^2}} + Uash \frac{V}{\sqrt{U^2 + Q_i^2}} - Q_i atn \frac{UV}{Q_i \sqrt{U^2 + V^2 + Q_i^2}} \right]_{V_2}^{V_1} \right]_{U_2}^{U_1} \quad (\text{A.5})$$

con:

$$U_1 = x_2; \quad U_2 = x_2 - l_1; \quad V_1 = y_2 + l_2; \quad V_2 = y_2$$

(expresiones genéricas para (A.4) y (A.5))

y:

$$Q_1 = 0; \quad Q_2 = 2t; \quad Q_3 = 2nh; \quad Q_4 = 2nh + 2t; \quad Q_5 = 2nh - 2t$$

Si ambos conductores están enterrados en el estrato inferior, de resistividad ρ_2 :

$$R_{21} = \frac{\rho_2}{4\pi l_1 l_2} \left[A_1 + A_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (A_3 - A_4) \right] \quad (\text{A.6})$$

con:

$$Q_1 = 0; \quad Q_2 = 2t; \quad Q_3 = 2nh + 2t; \quad Q_4 = 2(n - 2)h + 2t$$

Anexo B

Potenciales en un Terreno Biestratificado

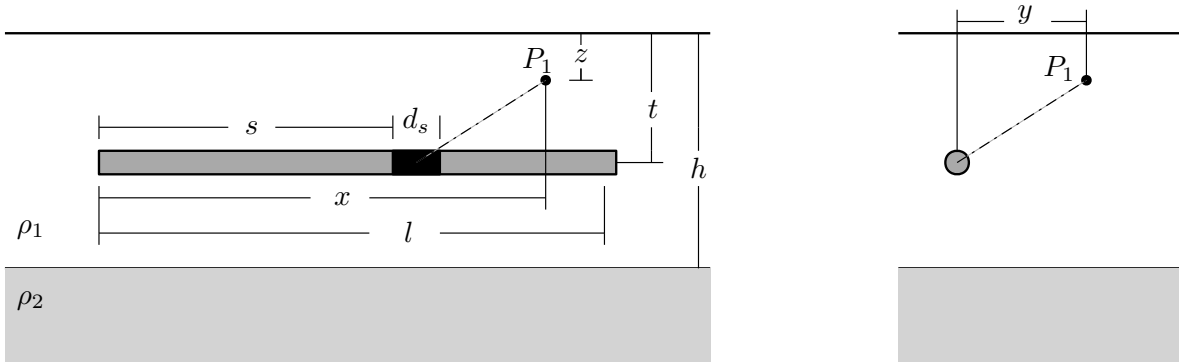


Figura B.1: conductor horizontal recto ubicado en el estrato superior de un terreno formado por 2 estratos [2].

Para un **conductor horizontal** recto ubicado en el **estrato superior** de resistividad ρ_1 , el potencial (generado por el conductor) en un punto cualquiera $P_1(x, y, z)$ del estrato superior, queda determinado como:

$$\phi_{P_1,1} = \frac{\rho_1 I}{4\pi l} \left\{ U_1 + U_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (U_3 + U_4 + U_5 + U_6) \right\} \quad (\text{B.1})$$

donde:

$$U_i = ash \frac{x}{\sqrt{W_i^2 + y^2}} - ash \frac{x-l}{\sqrt{W_i^2 + y^2}} \quad (\text{B.2})$$

(expresión genérica para (B.1), (B.3) y (B.4))

con:

$$\begin{aligned} W_1 = t - z; \quad W_2 = t + z; \quad W_3 = 2nh + t - z; \quad W_4 = 2nh - t - z; \\ W_5 = 2nh - t + z; \quad W_6 = 2nh + t + z \end{aligned}$$

Si el **conductor está ubicado en el estrato inferior**, el potencial que se produce en un **punto P_2 del mismo estrato** es:

$$\phi_{P2,2} = \frac{\rho_2 I}{4\pi l} \left\{ U_1 + U_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (U_3 - U_4) \right\} \quad (\text{B.3})$$

con:

$$W_1 = t - z; \quad W_2 = t + z; \quad W_3 = 2nh + t + z; \quad W_4 = 2(n - 2)h + t + z$$

El potencial en un **punto P_1 del estrato superior**, está determinado como:

$$\phi_{P1,2} = \frac{\rho_1 I}{4\pi l} (1 + K) \left\{ U_1 + U_2 + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (U_3 + U_4) \right\} \quad (\text{B.4})$$

con:

$$W_1 = t - z; \quad W_2 = t + z; \quad W_3 = 2nh + t - z; \quad W_4 = 2nh + t + z$$

Anexo C

Perfiles de Contorno del Potencial Superficial

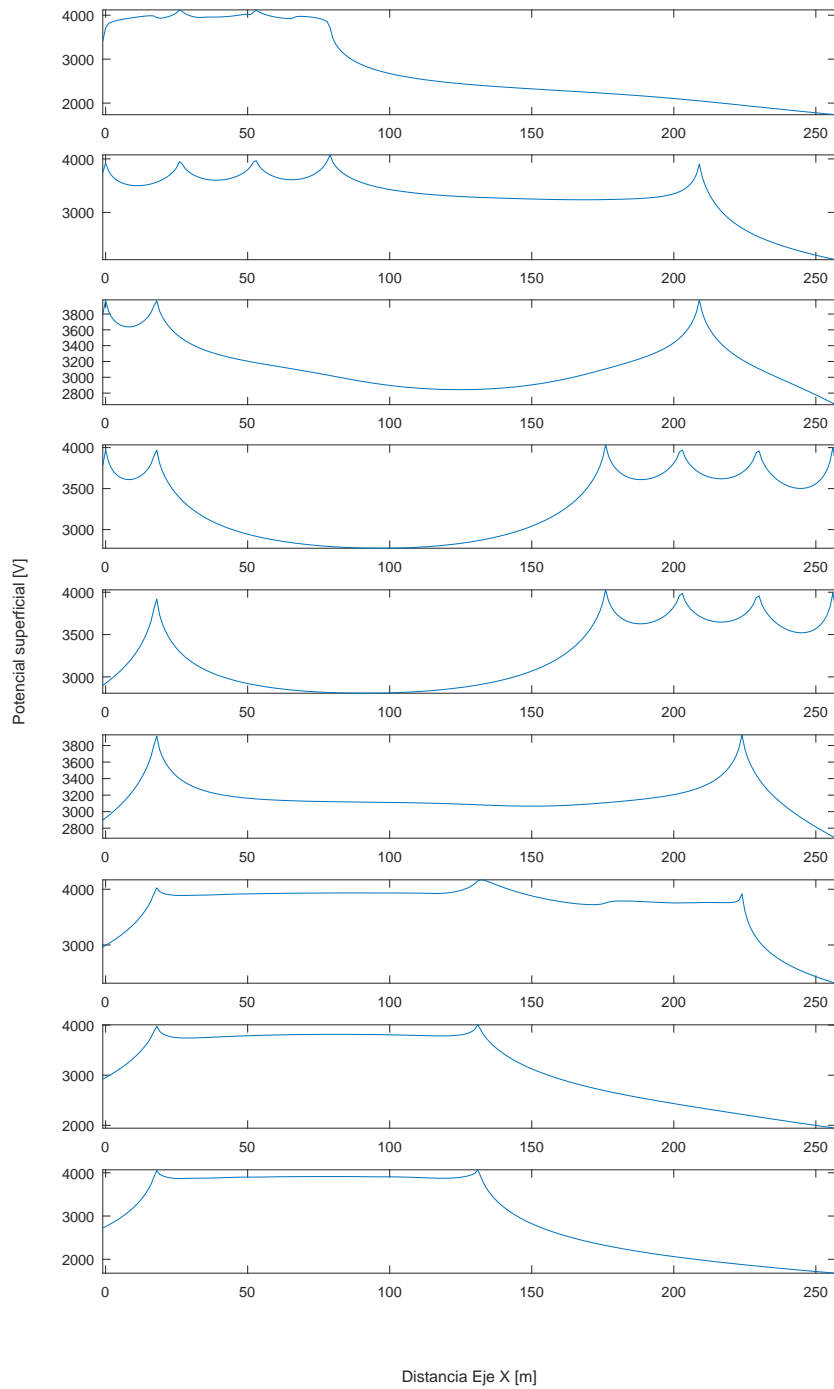


Figura C.1: Perfiles de contorno de potencial superficial en el plano XZ.

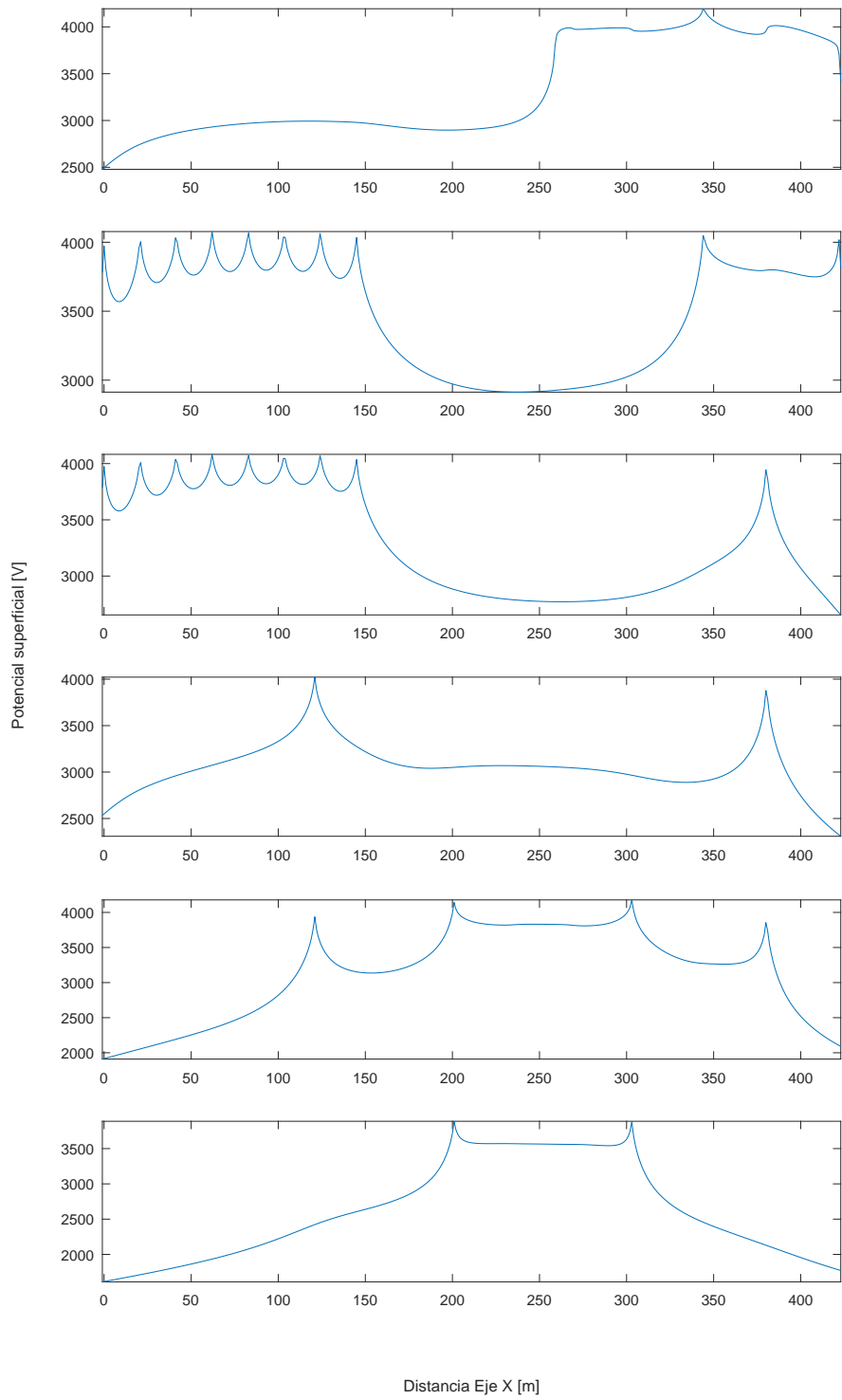


Figura C.2: Perfiles de contorno de potencial superficial en el plano YZ.

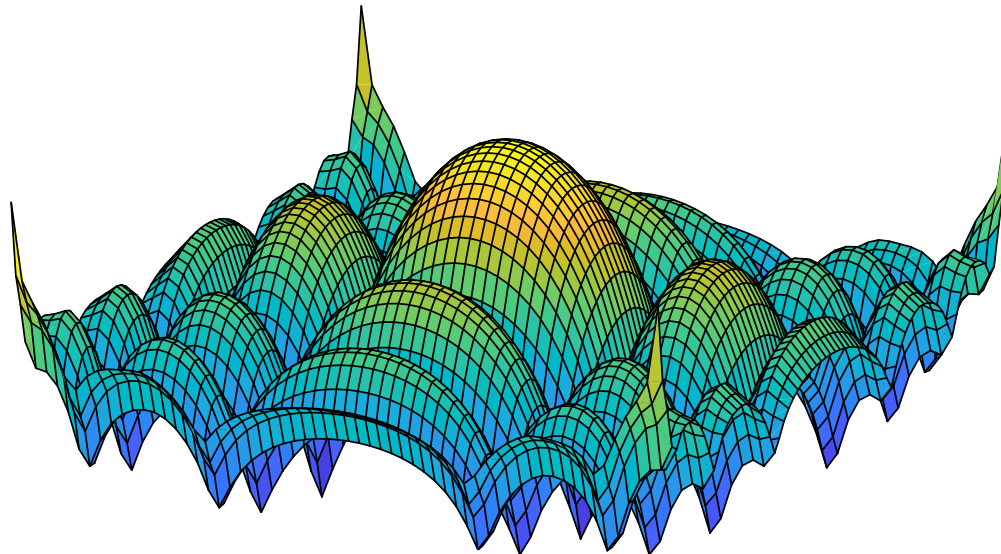
Anexo D

Manual del Usuario PAT v.1

Manual Rápido de Usuario

Programa PAT v.1

Herramienta para diseño de malla de puesta a tierra - MATLAB®2017



Índice

1. Presentación	4
1.1. Alcances y Restricciones	4
2. Inicio	5
3. Diseño Propio	6
3.1. Datos	6
3.2. Geométricas	7
3.3. Malla	8
3.4. Tensiones de Contacto	9
3.5. Tensiones de Paso	10
4. Algoritmo Genético	11
4.1. Datos	11
4.2. Optimización	12
4.3. Tensiones de Contacto	13
4.4. Tensiones de Paso	13
5. Evaluación de Diseño	14
5.1. Datos y Tensiones de Contacto	14
5.2. Tensiones de Paso	15
6. Anexo: Rutina LISP y archivo txt.	16

Glosario

- **Altura de estrato superior** [m]: Espesor del estrato superior de un terreno de 2 estratos.
- **Corriente de Cortocircuito** [A]: Corriente residual dispersada por una puesta a tierra, después de aplicar los factores de reducción respectivos.
- **Diámetro del conductor** [m]: Diámetro del conductor con el que se construye la malla horizontal de la puesta a tierra, generalmente se usa un calibre 4/0 AWG.
- **Discretización por elemento** [$-$]: Parámetro de simulación utilizado para obtener una mayor precisión en los resultados, al discretizar en mayor medida los elementos de la malla. Un elemento en la malla se define como un tramo de conductor entre dos uniones.
- **Espesor de la gravilla** [m]: Espesor de la capa de material artificial de resistividad ρ_s .
- **Largo en X** [m]: Longitud en el eje x del área de cobertura de la subestación.
- **Largo en Y** [m]: Longitud en el eje y del área de cobertura de la subestación.
- **Máximo tiempo de despeje de falla** [s]: Tiempo en general, de duración de una sobretensión o una sobrecorriente.
- **Número de subdivisiones en X** [$-$]: Número de módulos de una malla rectangular, en dirección del eje x .
- **Número de subdivisiones en Y** [$-$]: Número de módulos de una malla rectangular, en dirección del eje y .
- **Profundidad de enterramiento** [m]: Profundidad de enterramiento de los conductores horizontales de una puesta a tierra.
- **Resistividad de la gravilla** [Ωm]: Resistividad del material artificial que cubre el área abarcada por una puesta a tierra.
- **Resistividad superior del terreno** [Ωm]: Resistividad del estrato superior de un terreno de dos capas.
- **Resistividad inferior del terreno** [Ωm]: Resistividad del estrato inferior de un terreno de dos capas.

1. Presentación

El programa PAT es una herramienta de apoyo en el diseño ingenieril de mallas de puesta a tierra. Actualmente posee tres módulos con los cuales es posible; diseñar bajo condiciones establecidas, diseñar una malla optimizando su costo y evaluar una malla externa obtenida a partir de AUTOCAD. El desarrollo de la herramienta estuvo a cargo de:

- **Desarrollador:** Felipe Guzmán (Memorista UTFSM)
- **Apoyo Teórico y Técnico:** Rodrigo Castro
- **Apoyo Técnico:** Alex Müller

El presente documento corresponde a un manual rápido de uso de la herramienta, puesto que no ahonda en la teoría detrás del cálculo relativo a las mallas de puesta a tierra, además de no realizar una explicación del código y su funcionamiento.

1.1. Alcances y Restricciones

Actualmente la herramienta posee las características necesarias para poder realizar y evaluar diseños complejos de malla de puesta a tierra, ya que sus cálculos están generalizados para disposiciones genéricas de mallas horizontales. En este contexto se destacan las cualidades del programa:

- Posibilidad de evaluar diseños de mallas horizontales con diversas geometrías, aplicable por ejemplo a revisión de memorias de cálculo externas a Transelec S.A.
- Evaluar diseños en terrenos homogéneos o biestratificados.
- Generación automática de un reporte de resultados en formato PDF, en una estructura predefinida.
- Comparación directa de resultados con límites que establece la norma IEEE STD. 80TM.

Por otro lado, las restricciones que presenta la herramienta son:

- No es posible agregar varillas verticales en los diseños.
- Los elementos de la malla base deben ser perpendiculares u horizontales entre sí.

A continuación se procederá a describir gráficamente la herramienta y su forma de uso.

2. Inicio

Al abrir la herramienta, la pantalla de inicio es la que se muestra en la Figura (1).

En la barra superior se pueden observar las tres pestañas (adicionales al inicio), asociadas a las distintas funciones mencionadas previamente.

- **Diseño Propio:** Permite diseñar y evaluar modelos rectangulares, con los parámetros que desee ingresar el usuario; dimensiones exteriores de la malla, número de subdivisiones en los distintos ejes, profundidad de enterramiento, reticulado equis-espaciado o espaciado irregular y calibre de conductor.
- **Algoritmo Genético:** A partir de dimensiones externas de una malla rectangular esta función puede encontrar el óptimo económico basado en las variables de entradas ingresadas por el usuario y por las restricciones de la norma IEEE STD. 80TM.
- **Evaluación de Diseño:** Función que permite evaluar diseños de malla de puesta a tierra dibujados en AUTOCAD, esto se realiza a partir de un archivo .txt y una rutina LISP.

Las restricciones mencionadas en la sección anterior, aplican para todas las funciones mencionadas.

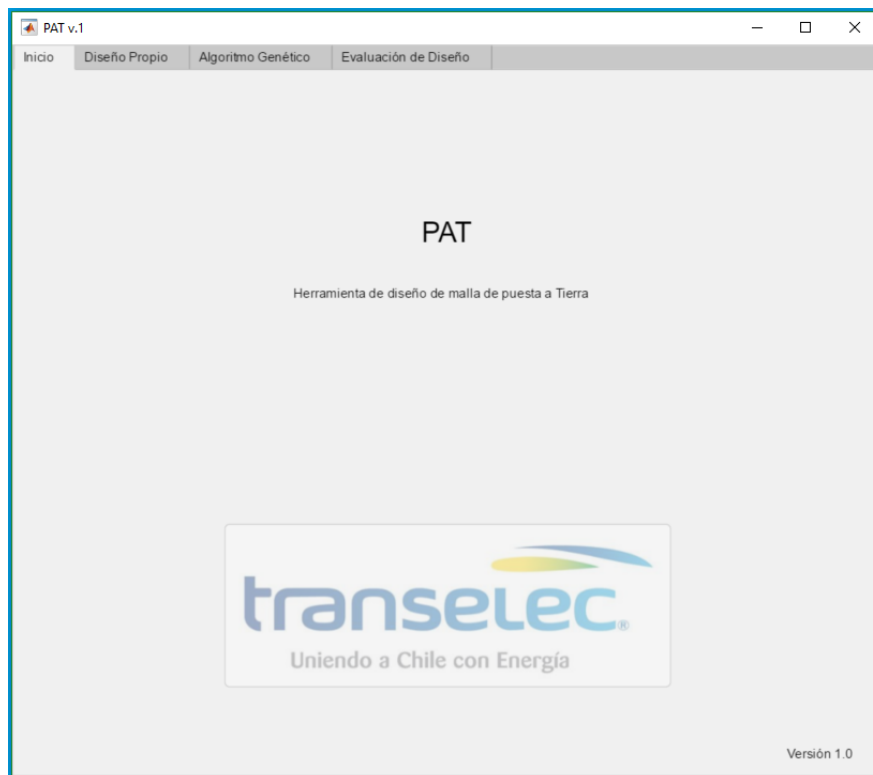


Figura 1: Pantalla de inicio de la herramienta.

3. Diseño Propio

3.1. Datos

Pantalla de ingreso de datos, Figura (2), principalmente datos asociados a las condiciones bajo los cuales deberá operar la malla de puesta a tierra, independiente de su estructura.

Ingrese características técnicas de la subestación y características del terreno:

Corriente de cortocircuito [A]

Máximo tiempo de despeje de falla [s]

Resistividad superior del terreno [Ω m]

Resistividad inferior del terreno [Ω m]

Altura de estrato superior [m]

Resistividad de la gravilla [Ω m]

Espesor de la gravilla [m]

Utilizar resistividad tipo: No Si

Tipo de terreno y resistividad: Barros, terrenc

Resistividad del Terreno [Ω m]

Obs: Se considera la peor condición del terreno.

Obs: En caso de utilizar un terreno homogéneo, ingresar el mismo valor de resistividad y una altura de terreno aleatoria pero mayor a cero.

Figura 2: Pantalla de Diseño Propio → Datos.

El selector que tiene el texto superior ‘*Utilizar resistividad tipo*’, tiene por objetivo acceder a valores de resistividad de terreno típicos según las características del suelo. Si se utiliza esta opción se evaluará un terreno homogéneo con valor de resistividad equivalente al mayor valor del tipo de suelo seleccionado.

Obs: En caso de utilizar un modelo de terreno homogéneo, se debe ingresar el mismo valor de resistividad en ambas casillas y una altura aleatoria para el estrato superior, pero mayor a cero.

3.2. Geométricas

Pantalla de ingreso de datos, Figura (3). En este caso se ingresan todos los valores asociados a la geometría y estructura de la malla de puesta a tierra. El detalle y significado de cada variable que se debe ingresar se encuentra en el *Glosario*.

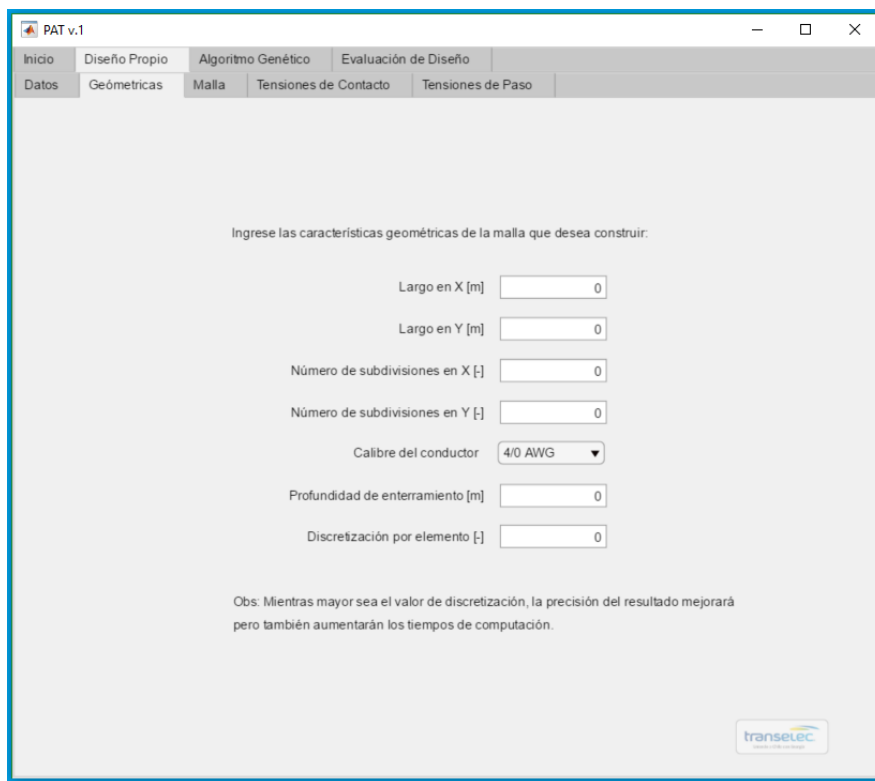


Figura 3: Pantalla de Diseño Propio → Geométricas.

Obs: La discretización por elemento es una variable que permite aumentar la precisión del resultado, realizando una representación más discreta del conductor. La consecuencia directa de aumentar este valor es el aumento de los tiempos computacionales.

3.3. Malla

Pantalla de representación de los datos ingresados en las pantallas previas, Figura (4). En la esquina inferior izquierda se encuentra un botón llamado ‘Dibujo Malla’ el cual tiene por función dibujar la malla en la cuadrícula superior, y además calcular el valor de resistencia de la malla a tierra. El valor de resistencia se entrega en el cuadro de texto ubicado en la esquina inferior derecha.

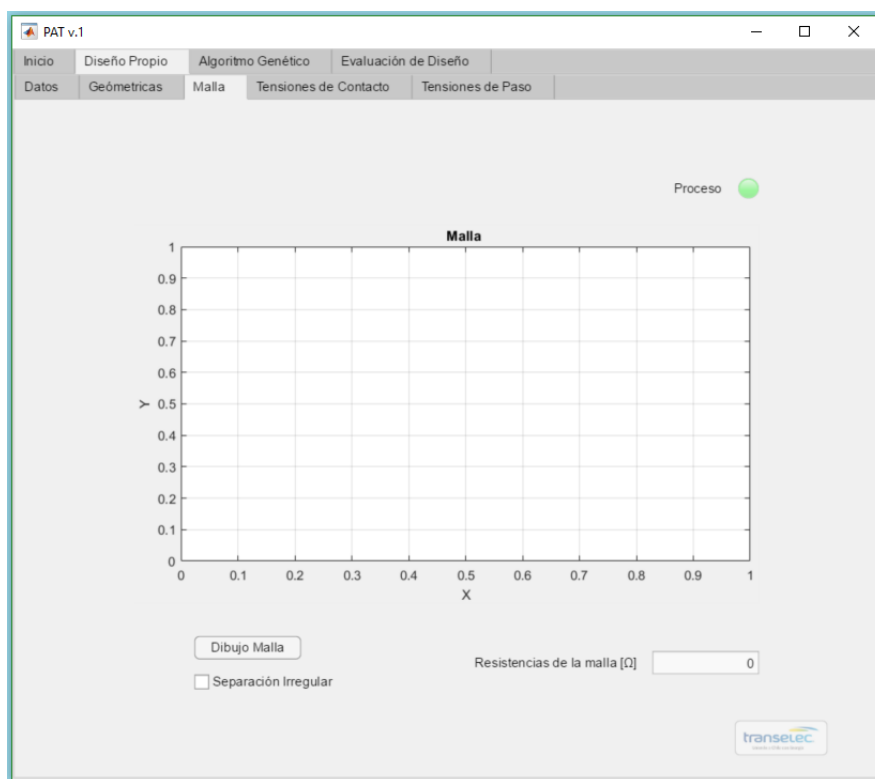


Figura 4: Pantalla de Diseño Propio → Malla.

Es importante mencionar que la separación que se utiliza **por defecto** es equiespaciada entre los distintos conductores. Si se marca la casilla ‘Separación irregular’ entonces al presionar nuevamente ‘Dibujo de Malla’ la separación que se observará en la cuadrícula será irregular. Una separación irregular, concentrando los conductores hacia el exterior de la malla, puede disminuir de manera considerable el valor máximo de tensión de contacto.

3.4. Tensiones de Contacto

Pantalla de cálculo de tensiones de contacto, Figura (5). Al presionar el botón ‘*Tensiones de Contacto*’ la herramienta calcula las tensiones de paso y contacto de la configuración de malla explicitada por los datos ingresados en las pantallas previas.

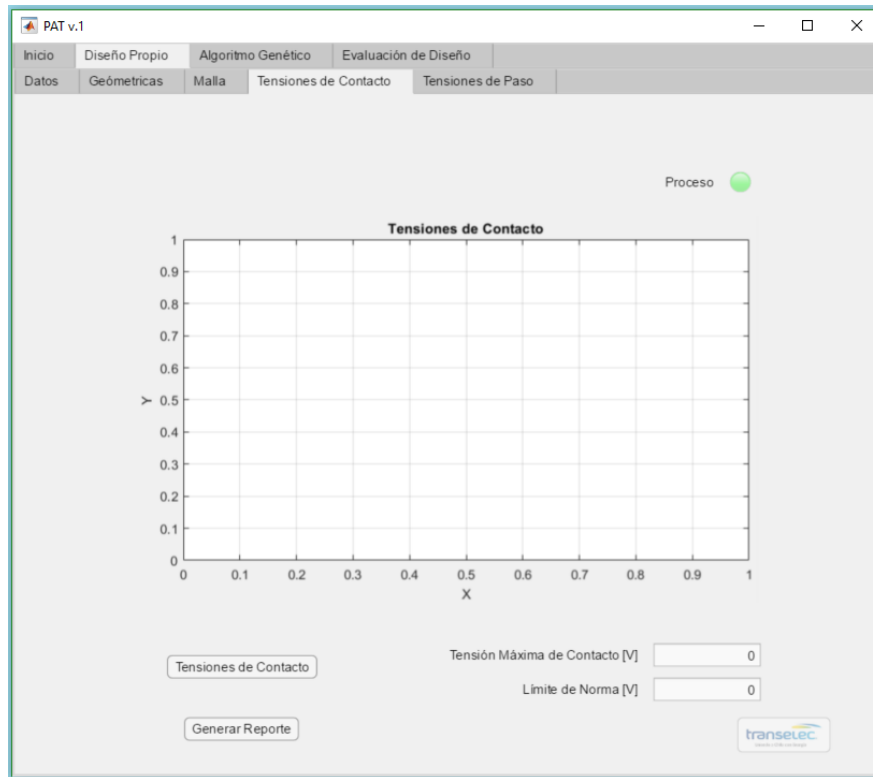


Figura 5: Pantalla de Diseño Propio → Tensiones de Contacto.

Además de representar las tensiones de contacto en la cuadrícula superior, entrega el máximo valor encontrado y el límite establecido por la norma IEEE STD. 80TM para un persona de 50 [kg].

El botón ‘*Generar Reporte*’ permite guardar los resultados obtenidos en un archivo PDF bajo un formato predefinido.

IMPORTANTE: Todos los gráficos que posean tres dimensiones, pueden ser rotados para comodidad visual del usuario. La posición en que queden rotados será la misma en la se imprimirán en el reporte.

3.5. Tensiones de Paso

Pantalla de visualización de resultados de tensiones de paso en un área que cubre 1 metro más hacia el exterior de la malla, Figura (6). La cuadrícula ubicada a la izquierda corresponde al potencial en la superficie del terreno, por el cual se producen las diferencias de potencial que generan las tensiones de paso.

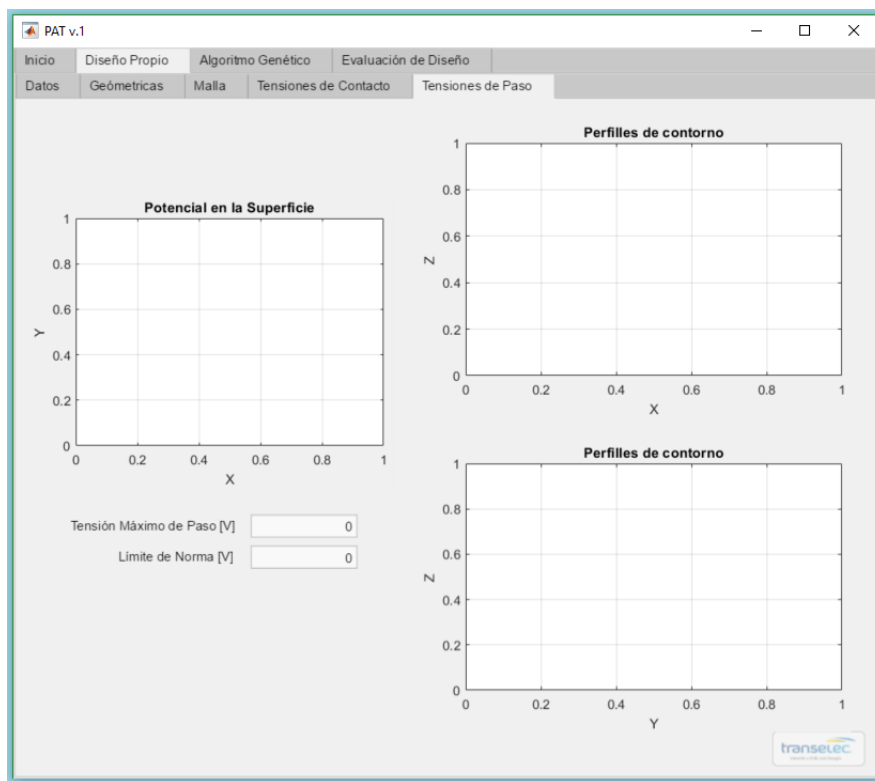


Figura 6: Pantalla de Diseño Propio → Tensiones de Paso.

Las cuadrículas del lado derecho son cortes transversales del potencial en la superficie, con el objetivo de visualizar de mejor manera la diferencia de potencial entre dos puntos espaciados a 1 [m].

Al igual que en el caso de las tensiones de contacto, los cuadros de texto ubicados en la parte inferior izquierda presentarán el valor máximo de tensión de paso encontrado en la malla y el límite impuesto por la norma.

IMPORTANTE: Todos los gráficos que posean tres dimensiones, pueden ser rotados para comodidad visual del usuario. La posición en que queden rotados será la misma en la se imprimirán en el reporte.

4. Algoritmo Genético

4.1. Datos

Pantalla de ingreso de datos para el algoritmo genético, Figura (7). Se deben ingresar los datos que describen el terreno y las condiciones de diseño bajo las cual operará la malla a tierra.

Figura 7: Pantalla de Algoritmo Genético → Datos.

Respecto a la geometría de la malla, se debe ingresar las dimensiones del área de cobertura de la malla.

El selector que tiene el texto superior '*Utilizar resistividad tipo*', tiene por objetivo acceder a valores de resistividad de terreno típicos según las características del suelo. Si se utiliza esta opción se evaluará un terreno homogéneo con valor de resistividad equivalente al mayor valor del tipo de suelo seleccionado.

Obs: En caso de utilizar un modelo de terreno homogéneo, se debe ingresar el mismo valor de resistividad en ambas casillas y una altura aleatoria para el estrato superior, pero mayor a cero.

4.2. Optimización

Ventana de proceso de optimización y presentación de resultados, Figura (8). El proceso de optimización posee extendidos tiempos computación por lo que se recomienda revisar la información ingresada en la pantalla previa.

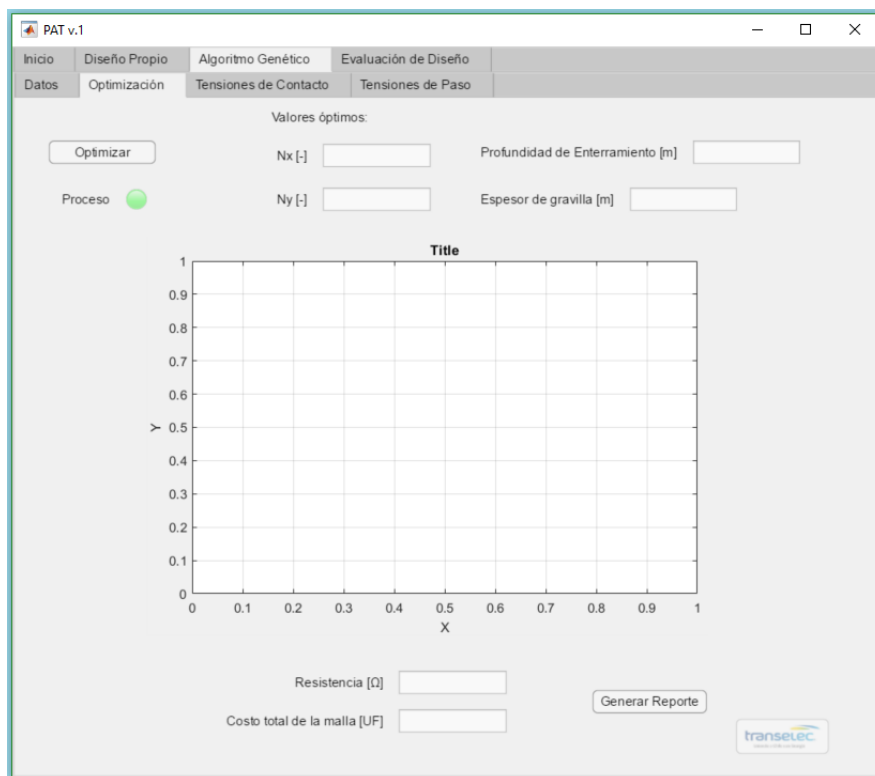


Figura 8: Pantalla de Algoritmo Genético → Optimización.

Los resultados de la optimización se presentarán en las casillas ubicadas en la parte superior derecha, donde las variables a optimizar son; el número de subdivisiones en el eje x e y , profundidad de enterramiento de la malla horizontal y espesor de la gravilla.

Además, al pulsar el botón ‘*Optimizar*’ y finalizar el proceso se presentará, en la cuadrícula inferior, la malla óptima para las condiciones especificadas en la pantalla anterior. En las casillas inferiores se presenta el valor de resistencia de la malla propuesta, y un costo estimado de los materiales e instalación de la misma.

El botón ‘*Generar Reporte*’ permite guardar los resultados obtenidos en un archivo PDF bajo un formato predefinido.

4.3. Tensiones de Contacto

Todo lo explicado en la Sección (3.4) aplica para esta pantalla, a excepción del botón de ‘*Generar Reporte*’ que en esta pantalla no se encuentra.

Los resultados presentados en esta pantalla (Figura 9) se calculan inmediatamente al presionar el botón ‘*Optimizar*’ de la pantalla anterior.

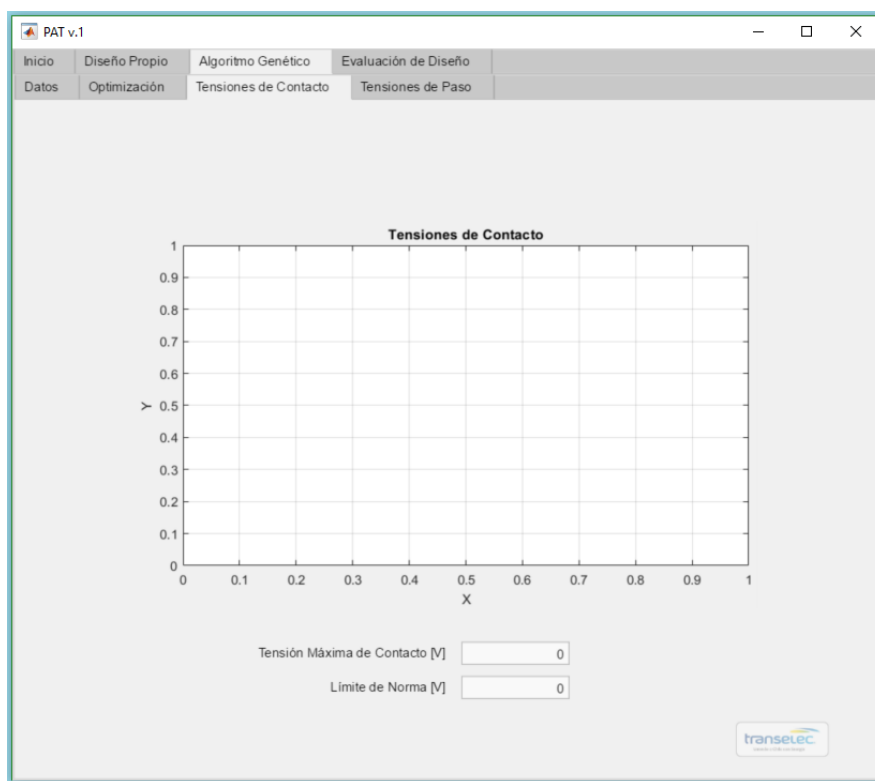


Figura 9: Pantalla de Algoritmo Genético → Tensiones de Contacto.

IMPORTANTE: Todos los gráficos que posean tres dimensiones, pueden ser rotados para comodidad visual del usuario. La posición en que queden rotados será la misma en la se imprimirán en el reporte.

4.4. Tensiones de Paso

Todo lo explicado en la Sección (3.5) aplica para esta pantalla.

Los resultados presentados en esta pantalla se calculan inmediatamente al presionar el botón ‘*Optimizar*’ de la pantalla *Optimización*.

5. Evaluación de Diseño

5.1. Datos y Tensiones de Contacto

Pantalla de ingreso de datos y presentación de resultados para la evaluación un diseño de malla de puesta a tierra externo, Figura (10).

Lo primero que se debe realizar en esta pantalla es cargar los datos de la malla con el botón ‘*Importar Datos*’. El programa solo acepta archivos de formato *.txt* y con cierta estructura de datos.

The screenshot shows the 'PAT v.1' software interface. The main window has tabs for 'Inicio', 'Diseño Propio', 'Algoritmo Genético', and 'Evaluación de Diseño'. Under 'Evaluación de Diseño', there are sub-tabs for 'Datos y T. de Contacto' and 'Tensiones de Paso'. The 'Datos y T. de Contacto' sub-tab is active, showing a form with various input fields and a graph.

Form fields include:

- Importar Datos (button)
- Dirección de Documento (text box)
- Nombre del Documento (text box)
- Corriente de cortocircuito [A] (text box, value 0)
- Máximo tiempo de despeje de falla [s] (text box, value 0)
- Resistividad de la gravilla [Ωm] (dropdown menu, value 2500)
- Resistividad superior del terreno [Ωm] (text box, value 0)
- Resistividad inferior del terreno [Ωm] (text box, value 0)
- Altura de estrato superior [m] (text box, value 0)
- Calibre del conductor (dropdown menu, value 4/0 AWG)
- Profundidad de enterramiento [m] (text box, value 0)
- Espesor de la gravilla [m] (text box, value 0)
- Utilizar resistividad tipo (toggle switch, currently 'No')
- Tipo de terreno y resistividad (dropdown menu, value 'Barros, terrenc')
- Resistividad del Terreno [Ωm] (text box, value 0)
- Obs: Se considera la peor condición del terreno.
- Resistencia de la Malla [Ω] (text box, value 0)
- Tensión Máxima de Contacto [V] (text box, value 0)
- Límite de Norma [V] (text box, value 0)
- Evaluación de Malla (button)
- Proceso (status indicator, green circle)
- Generar Reporte (button)
- transelec logo

A graph titled 'Tensiones de contacto' is located in the lower-left quadrant. The x-axis is labeled 'X' and ranges from 0 to 1. The y-axis is labeled 'Y' and ranges from 0 to 1. The graph area is currently empty.

Figura 10: Pantalla de Evaluación de Diseño → Datos y T. de Contacto.

Al igual que en las pantallas de datos de las funciones anteriores, se deben ingresar las características del terreno y las condiciones bajo las cuales trabajará la malla de puesta a tierra. Con el botón de ‘*Evaluación de Malla*’ se entregarán los resultados de tensiones de contacto, resistencia y límites de norma en las casillas respectivas.

El selector que tiene el texto superior ‘*Utilizar resistividad tipo*’, tiene por objetivo acceder a valores de resistividad de terreno típicos según las características del suelo. Si se utiliza esta opción se evaluará un terreno homogéneo con valor de resistividad equivalente al mayor valor del tipo de suelo seleccionado.

El botón ‘*Generar Reporte*’ permite guardar los resultados obtenidos en un archivo PDF bajo un formato predefinido.

IMPORTANTE: Todos los gráficos que posean tres dimensiones, pueden ser rotados para comodidad visual del usuario. La posición en que queden rotados será la misma en la se imprimirán en el reporte.

5.2. Tensiones de Paso

Todo lo explicado en la Sección (3.5) aplica para esta pantalla.

Los resultados presentados en esta pantalla se calculan inmediatamente al presionar el botón '*Generar Reporte*' de la pantalla anterior.

6. Anexo: Rutina LISP y archivo txt.

Para poder evaluar un diseño generado en AUTOCAD se requiere que el usuario realice algunas modificaciones al dibujo, de manera tal que la información extraída a partir de este, sea la correcta.

La obtención de un archivo TXT. con la información de un diseño en AUTOCAD requiere de dos pasos previos que son detallan a continuación.

Modificación del Dibujo

Supóngase un diseño de malla de puesta a tierra de 12x16[m] y 2x2 divisiones, como se muestra en la Figura (11).

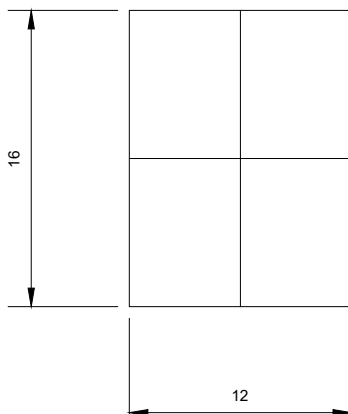


Figura 11: Cuadrícula de 12x16 [m] y 2x2 divisiones.

Para el correcto funcionamiento de la herramienta de MATLAB, esta debe poseer la información de los elementos de conductor y los nodos de la malla. Para identificar cada elemento se designaron las siguiente formas; **círculo** para **nodos** y **elipse** para los **elementos** de conductor. Las condiciones para incluir estas formas en el dibujo de la Figura (11) son que todas las formas deben poseer su centro geométrico en el nodo para los círculos y en el punto medio del elemento de conductor para las elipses. Lo descrito anteriormente se observa en la Figura (12). **Los tamaños y disposiciones (rotación, dirección) de cada elipse y círculo no poseen importancia, lo trascendental es que el tipo de forma utilizado sea el correcto y que se encuentre ubicado según lo descrito.**

Existen consideraciones especiales para los dibujos en caso de que existan irregularidades o el diseño no

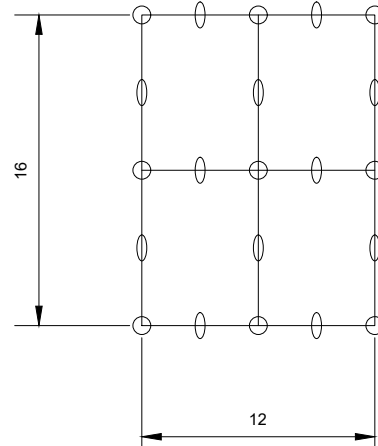


Figura 12: Cuadrícula modificada de 12x16 [m] y 2x2 divisiones.

sea simétrico, esto principalmente se debe realizar para la correcta interpretación de los datos a ingresar en la herramienta. Se supone ahora que la cuadrícula ya no es simétrica y una de los elementos de conductor de la derecha desciende un cierto valor de longitud en el eje y, como se observa en la Figura (13).

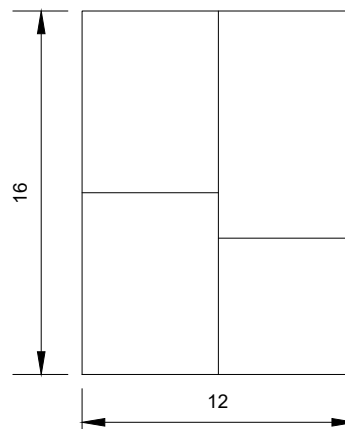


Figura 13: Variaciones a cuadrícula simétrica de 12x16 [m] y 2x2 divisiones.

Para realizar las modificaciones al dibujo se debe ahora considerar que el número de elementos de conductor aumentó en la columna central, de 2 a 3. Un **elemento de conductor** se define como la **porción de conductor que se encuentra entre dos nodos**, de esta manera ahora existen mayor cantidad de nodos y elementos. Debido al algoritmo de trabajo del programa de MATLAB, esta división extra de elementos debe ser traspasada al resto de malla. Es decir, todas las columnas quedarán con el mismo número de nodos y elementos, pero no necesariamente un nodo estará representado por una unión perpendicular de conductores. Para entender de mejor manera la situación descrita observar la Figura (14).

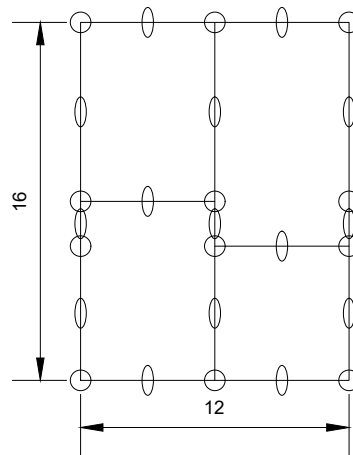


Figura 14: Cuadrícula asimétrica modificada de 12x16 [m] y 2x2 divisiones.

Esta condición especial debe ser aplicada en ambas direcciones del dibujo (x e y). Para un entendimiento íntegro de la manera de incluir estas formas en la malla base, se adjunta el dibujo de una malla más compleja y su correspondiente modificación (Figura 15).

Obtención de archivo .txt

Para obtener el archivo .txt lo primero que se debe realizar es cargar el archivo `Lisp.lsp` en AUTOCAD con el comando `APpload`. Posterior a cargar la rutina lisp en el software se debe seleccionar toda la malla modificada (incluyendo círculos y elipses) y ocupar el nuevo comando `PTS` (ingresado con la rutina lisp). Este proceso generará un archivo .txt que podrá ser leído por la herramienta en MATLAB.

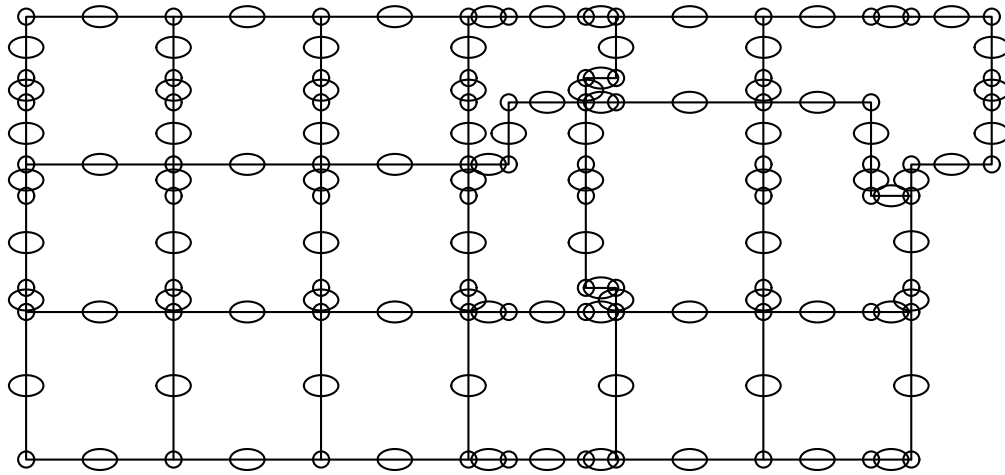


Figura 15: Malla de instalación convertidora de línea aérea a subterránea - Lo Aguirre- Cerro Navia 220 kV.