

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Optimización multiobjetivo de mallas de tierra de subestaciones

Autor: Alejandro Duardo Toste

Tutor: Dr. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

**Profesor Titular
Centro de Estudios Electroenergéticos
Facultad de Ingeniería Eléctrica
valca@uclv.edu.cu**

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: La Voluntad.”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a aquellas personas que confiaron en mí en los momentos más difíciles,

En especial a mi mamá por amarme, cuidarme y ayudarme en todo momento a lo largo de mi carrera.

A mi papá que siempre me ha indicado el camino correcto.

Mi hermanita por su amor único, y que este logro puede ser un ejemplo a seguir.

A mi abuela Estela, el ejemplo más grande de sacrificio, amor y entrega que he conocido.

A mi familia en general, a mi novia y amigos por brindarme su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a quien nos ayuda no es sencillamente un acto de cortesía sino un noble deber, por ello agradezco infinitamente a:

Mis padres y demás familiares por su ayuda, por haber demostrado que toda meta trazada se alcanza con interés y dedicación.

Mi tutor por su ayuda incondicional durante todo este tiempo de intenso trabajo.

Mis amigos y compañeros de estudio, quienes han sabido brindarme su mano amiga en cada etapa de la carrera en especial a Carlos, Víctor, Jorge Luis y Capote a todos muchas gracias.

Mis profesores a quienes no olvidaré por su contribución en mi formación profesional.

A todos muchas gracias por ayudarme a ser quien soy.

TAREA TÉCNICA

Para el desarrollo de este Trabajo de Diploma se plantearon diferentes aspectos y tareas

como son:

1. Estudio del estado actual de optimización en el programa PAST.
2. Valorar posibles métodos de optimización multiobjetivo y definir cual se va a usar.
3. Desarrollar modelo de optimización multiobjetivo.
4. Proponer ejemplos de mallas de tierra.
5. Comparación entre el método de optimización que emplea el programa PAST y el método de optimización multiobjetivo implementado.
6. Análisis de los resultados.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En este trabajo se presenta la optimización de mallas de tierra de subestaciones de potencia usando la filosofía del algoritmo multiobjetivo elitista NSGA-II, explicando su esquema de funcionamiento y los mecanismos especiales que permiten la preservación y la evolución de soluciones Pareto-óptimas. Este algoritmo se compara con el método de optimización implementado en el programa PAST 1.0, que se basa en un proceso de cuasi-optimización, obtenido de una correlación de soluciones cuasi-exactas de optimización. La optimización multiobjetivo permite una reducción de los costos muy superior a la que se obtiene por el proceso de cuasi-optimización, aunque los tiempos de computo requeridos para llegar a la solución final, hasta el momento resultan muy grande.

ÍNDICE

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
ÍNDICE	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA ...	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Modelos de optimización.....	4
1.2.1 Modelo y modelado	4
1.3 Etapas en el desarrollo de un modelo	5
1.3.1 Identificación del problema.....	6
1.3.2 Especificación matemática y formulación	6
1.3.3 Resolución.....	7
1.3.4 Verificación, validación y refinamiento	7
1.3.5 Interpretación y análisis de los resultados.....	8
1.3.6 Implantación, documentación y mantenimiento.....	8
1.4. Optimización multiobjetivo	8
1.4.1 Conceptos básicos acerca de la optimización multiobjetivo	9
1.4.2. Algoritmo NSGA-II	12
1.4.3 Algoritmo NSGA-II modificado.....	14

CAPÍTULO 2. DISEÑO ÓPTIMO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA DE SUBESTACIONES	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Implementación del método de correlación de soluciones cuasi-exactas de optimización en el Programa PAST	16
2.2.1 Determinación de la cantidad de conductores en el diseño de una malla	16
2.2.2 Optimización de mallas de puesta a tierra.....	19
2.2.3 Valores de α_A y α_B para una malla rectangular	23
2.2.4 Optimización de sección del conductor y profundidad de enterramiento	26
2.3. Implementación del algoritmo multiobjetivo NSGA-II	27
CAPÍTULO 3. COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	30
3.1. Introducción.....	30
3.2. Optimización de la malla de 50 x 40 m por el método del PAST	34
3.3. Optimización de la malla de 220 x 180 m por el método del PAST	36
3.4. Optimización de la malla de 50 x 40 m por el método de la NSGA II.....	38
3.5. Optimización de la malla de 220 x 180 m por el método de la NSGA II	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
Conclusiones	44
Recomendaciones	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

INTRODUCCIÓN

La necesidad de una referencia a tierra en los sistemas eléctricos de alta tensión viene dada por las experiencias y análisis que explicaron las dificultades y desventajas que estos presentaron cuando se pretendía que fueran a operar aislados de tierra. Lo que trajo consigo el surgimiento y desarrollo de métodos matemáticos de determinación de la resistencia de contacto con el terreno de los sistemas de puesta a tierra. La complejidad de estos métodos obligó a buscar soluciones que aunque fuesen aproximadas cumplieran con las condiciones y requisitos necesarios, dando paso a una serie de métodos aproximados que brindan una solución rápida y una exactitud aceptable desde el punto de vista práctico, que aún hoy tienen amplia utilización. Prestigiosas instituciones como la IEEE en su norma Std 80 del 2000 propone un método que se ha ido perfeccionando con los años pero no deja de ser un método aproximado. El desarrollo alcanzado por los medios de cómputo, ha permitido retomar métodos exactos como el de las imágenes de Maxwell y el desarrollo de otros nuevos utilizando fundamentalmente métodos numéricos que permiten no solo una mayor exactitud en los cálculos sino también la posibilidad de optimización de la cantidad de conductores a enterrar y por tanto también de las excavaciones necesarias.

Por lo antes expuesto el problema a solucionar con este trabajo es:

¿Cómo implementar un Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo para la optimización de mallas de tierra en subestaciones de potencia?

Cuyas preguntas de investigación pueden ser:

- ¿Cómo definir funciones características de mallas de tierra?
- ¿Cómo implementar las funciones establecidas en el algoritmo multiobjetivo NSGA-II?
- ¿Cómo establecer una comparación eficaz entre este algoritmo multiobjetivo y el método de optimización del PAST?

El objetivo general del trabajo está encaminado a determinar la malla más óptima en cuanto al proyecto económico, cumpliendo con lo normado en cuanto a resistencia de puesta a tierra y potenciales de paso y contacto, empleando un Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (MOEAs) que combina técnicas de computación evolutiva con la teoría de optimización multiobjetivo, y que por lo tanto brinda la posibilidad de encontrar una solución totalmente óptima. Para lograr el objetivo propuesto se proponen los objetivos específicos siguientes:

- Definir las funciones características en mallas de tierra (costo, longitud de electrodos, diámetro de conductores y profundidad de enterramiento).
- Evaluar las técnicas de optimización usadas actualmente en el programa PAST.
- Evaluar las técnicas de optimización multiobjetivos NSGA-II para las funciones establecidas.

Organización del informe

El trabajo quedó estructurado en tres capítulos, un primero para Revisión de bibliografía sobre métodos de optimización, un segundo para Caracterizar los dos métodos de optimización algoritmo multiobjetivo y un tercero para la comparación de resultados entre NSGA-II y el PAST.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1.1 Introducción

Hoy en día, prácticamente todos los sistemas se proyectan para operar sólidamente conectados a tierra. Desde los primeros inicios se fueron desarrollando métodos de proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra, que por la complejidad del asunto implicaban procedimientos matemáticos muy laboriosos para la época, lo que obligó a recurrir a métodos que aunque aproximados cumplieran con las exigencias de la práctica laboral. Las instalaciones eléctricas de cualquier tipo, por razones de seguridad para el personal que las opera, es necesario que mantengan el menor potencial posible respecto a tierra, tanto bajo condiciones de operación normales como bajo condiciones de falla. La posibilidad de que en cualquiera de las partes metálicas accesibles al contacto con las personas se presenten potenciales respecto a tierra peligrosos se puede reducir considerablemente, e incluso llegar a eliminarse, mediante la puesta a tierra de las mismas. El valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser lo más pequeño posible a fin de limitar la tensión. Sin embargo, una puesta a tierra no puede considerarse buena, solo por presentar un bajo valor de resistencia, ya que es necesario que se cumpla que el producto de la corriente de falla multiplicado por la impedancia de la puesta a tierra dé un valor de tensión que no sea peligroso para el hombre y que, además, satisfaga los requerimientos de operación de la instalación.

1.2 Modelos de optimización

1.2.1 Modelo y modelado

Modelo: Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja (por ejemplo, la evolución económica de un país), que se labora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Un modelo es una representación matemática simplificada de una realidad compleja. Modelar es la acción de construir un modelo, de encorsetar la realidad. Implica la relación entre dos figuras (no necesariamente encarnadas por personas únicas sino por equipos): el modelador (encargado de la especificación y desarrollo del modelo) y el experto sobre la realidad (conocedor del problema real). La mayoría de las veces, el desarrollo de un modelo puede involucrar a un equipo multidisciplinar compuesto por matemáticos, estadísticos, ingenieros, economistas, psicólogos, etc. que aportan diferentes perspectivas y conocimiento en la representación de la realidad. Un modelo debe equilibrar la necesidad de contemplar todos los detalles con la factibilidad de encontrar técnicas de solución adecuadas. Un modelo es, en definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser inteligibles y útiles. Modelar se puede entender simultáneamente como ciencia y como arte. Es una ciencia pues se basa en un conjunto de procesos estructurados: análisis y detección de las relaciones entre los datos, establecimiento de suposiciones y aproximaciones en la representación de los problemas, desarrollo o uso de algoritmos específicos de solución. Es un arte porque materializa una visión o interpretación de la realidad no siempre de manera unívoca. Cada persona imprime su estilo en el modelo mismo y en la especificación, en el desarrollo y en la documentación.

Características tales como elegancia o simplicidad pueden atribuirse a un modelo. El desarrollo de un modelo es una creación hecha con ayuda de ciencias básicas o herramientas de apoyo. Entre los beneficios explícitos o implícitos, tanto para el modelador como para el experto, derivados del proceso de modelado además del modelo en sí mismo, se pueden mencionar:

Ayuda a establecer un diálogo con intercambio de información entre el modelador y el experto

Organiza los datos, la información disponible sobre el sistema.

Organiza, estructura y mejora la comprensión del sistema.

Internaliza la estructura organizativa de la empresa.

Permite compartir supuestos y resultados entre el modelador y el experto.

Proporciona un entorno ágil para el análisis y la sensibilidad.

Indica la dirección de mejora en las decisiones.

En este capítulo se hace un análisis de diferentes modelos de optimización, es decir, aquéllos donde existe un conjunto de variables de decisión que deben maximizar/minimizar una función objetivo sometidas a un conjunto de restricciones. Los modelos de programación lineal son más utilizados que todos los otros tipos de optimización juntos y abarcan cualquier tipo de actividad humana como micro y macroeconomía, finanzas, marketing, economía de la energía, organización de la producción, planificación de la operación, selección de procesos, asignación de tareas, ingeniería química, forestal, agrónoma, comercio internacional, desarrollo económico, etc. Como referencias generales de modelado de problemas de optimización que se pueden utilizar en la enseñanza de pregrado o postgrado cabe citar en [1].

1.3 Etapas en el desarrollo de un modelo

Las etapas que componen el ciclo de vida de un modelo son las siguientes:

- Identificación del problema
- Especificación matemática y formulación
- Resolución
- Verificación, validación y refinamiento
- Interpretación y análisis de los resultados
- Implantación, documentación y mantenimiento.

1.3.1 Identificación del problema

Consiste en la recolección y análisis de la información relevante para el problema, en el intercambio de información entre el modelador y el experto, en establecer una relación simbiótica y una estrecha coordinación entre ambos. Los problemas reales suelen estar definidos en términos vagos e imprecisos. Se debe hacer la tarea de traducción o interpretación en frases precisas, convertibles en ecuaciones matemáticas. En esta etapa se establecen y documentan los supuestos realizados que en etapas posteriores deberán ser validados. Esta etapa es fundamental para que las soluciones proporcionadas, las conclusiones obtenidas sean útiles, las decisiones adoptadas sean correctas. Los datos suelen ser vitales para conseguir un realismo o aplicabilidad en las soluciones. A menudo representan el cuello de botella del proceso de modelado.

1.3.2 Especificación matemática y formulación

Escritura matemática del problema de optimización, definiendo sus variables, sus ecuaciones, su función objetivo, sus parámetros. En esta etapa se analiza el tamaño del problema, la estructura de la matriz de restricciones, su tipo (LP, MIP, NLP). Es una etapa de creación donde se debe prestar especial atención a la precisión en la formulación y a la escritura de las ecuaciones que describen el problema. Hay que tener en cuenta, además, que existen diversas alternativas de modelado (especialmente en programación entera) que afectan de manera fundamental en la resolución del mismo, existiendo un desarrollo cada vez mayor en la reformulación de problemas. La caracterización de un problema LP según su tamaño resulta difícil y ha sufrido un gran cambio desde los recientes desarrollos de algoritmos simples mejorados y, sobre todo, desde la aparición de los métodos de punto interior. En la tabla 1.1 se propone una clasificación de tipos de problemas LP según su tamaño. Esta clasificación debe ser tomada como guía o referencia relativa actual pero téngase en cuenta que los tamaños relativos de los problemas cambiarán conforme evolucionen los códigos de optimización. Actualmente se puede afirmar que los códigos de optimización lineal implantan

algoritmos muy eficientes, son fiables y numéricamente robustos, y están ampliamente disponibles.

Tabla 1.1 Tipos de problemas LP según su tamaño

	Restricciones	Variables
Caso Ejemplo	100	100
Tamaño Medio	10000	10000
Gran Tamaño	100000	100000
Muy Gran Tamaño	> 100000	> 100000

En lo referente a MIP o NLP ni siquiera se pueden dar criterios generales de tamaño ya que la dificultad de resolución no tiene por qué estar ligada al tamaño del problema, siendo incluso preferible reformular un problema aunque aumenten las dimensiones, para lograr una resolución más eficiente.

1.3.3 Resolución

Se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica (muy próxima a la matemática) óptima o cuasióptima. El algoritmo puede ser de propósito general (método simplex) o específico. Puede haber diferentes métodos de solución de un problema o diferentes implantaciones de un mismo método. El tiempo de resolución de un problema también puede depender drásticamente de su formulación. La solución óptima debe ser suficientemente satisfactoria, debe ser una guía de actuación para el experto.

1.3.4 Verificación, validación y refinamiento

Esta etapa conlleva la eliminación de los errores en la codificación, es decir, conseguir que el modelo haga lo que se desea (depurar y verificar). Es necesario comprobar la validez de las simplificaciones realizadas a través de los resultados obtenidos, incluso contrastando éstos con situaciones reales ya transcurridas (validar). Esta etapa de verificación, validación, comprobación da lugar a nuevas

necesidades de modelado para mejorar la capacidad de representación de la realidad, a nuevos refinamientos indicados por el usuario.

1.3.5 Interpretación y análisis de los resultados

Esta etapa consiste en proponer soluciones. Permite conocer en detalle el comportamiento del modelo al hacer un análisis de sensibilidad en los parámetros de entrada, estudiar diferentes escenarios plausibles de los parámetros, detectar soluciones alternativas cuasióptimas pero suficientemente atractivas, comprobar la robustez de la solución óptima.

1.3.6 Implantación, documentación y mantenimiento

Es una etapa fundamental del desarrollo de un modelo para garantizar su amplia difusión. La documentación ha de ser clara, precisa y completa. El manual de usuario debe incluir la especificación técnica funcional, matemática e informática. El propio código debe incluir una buena documentación para facilitar la tarea del mantenimiento. Piénsese que la mayor parte del ciclo de vida de un modelo no está en el desarrollo sino en la fase de uso y mantenimiento. En esta etapa se incluye también la tarea de formación para los usuarios del modelo.

1.4. Optimización multiobjetivo

Cuando en un problema de optimización se tienen varias funciones objetivo, la tarea de encontrar una o más soluciones óptimas es denominada optimización multiobjetivo o toma de decisiones multicriterio. Bajo este enfoque la atención no se puede centrar solo en uno de los objetivos dejando a un lado los otros. Diferentes soluciones pueden producir soluciones trade off (escenarios en conflicto) entre diferentes objetivos. Una solución que es óptima con respecto a un objetivo puede no serlo para el resto, por lo tanto sería impropio escoger dicha solución como óptima del problema y se crea la necesidad de establecer un compromiso entre los objetivos.

Los problemas con múltiples objetivos se encuentran presentes en la mayoría de las disciplinas y su solución siempre ha representado un reto para los investigadores.

La principal motivación para el uso de novedosos algoritmos, como los de la familia de los evolutivos, en la solución de problemas de este tipo radica en que al estar basados en población para realizar búsqueda de soluciones, éstos pueden retornar un conjunto de soluciones de buena calidad, hecho que es de alta importancia en este tipo de enfoques.

1.4.1 Conceptos básicos acerca de la optimización multiobjetivo

El modelo matemático general de un problema de optimización MO se presenta en la ecuación

$$\begin{aligned} \min/\max : f_m(x), \quad m = 1, 2, \dots, M \\ \text{s.a.} \\ g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^l \leq x \leq x_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \tag{1}$$

Para resolver el anterior problema se deben definir algunos criterios con el fin de determinar cuáles soluciones se consideran de buena calidad y cuáles no.

Para lo anterior se introduce el concepto de dominancia, que coadyuva en el proceso de clasificar las diferentes soluciones y de encontrar buenas alternativas teniendo en cuenta la presencia y la cuantificación de los M objetivos del problema [2].

Se dice que una solución x^1 domina a otra solución x^2 si se cumplen las siguientes condiciones:

1. La solución x^1 no es peor que x^2 en todos los objetivos.
2. La solución x^1 es estrictamente mejor que x^2 en por lo menos un objetivo.

Si alguna de las condiciones es violada, la solución x^1 no domina la solución x^2 .

El concepto de dominancia se puede extender para encontrar un conjunto de soluciones no dominadas dentro de una población. Si se considera una población de N soluciones cada una con M valores de funciones objetivo, se usa el siguiente procedimiento para encontrar el conjunto no dominado de soluciones se usa el siguiente procedimiento para encontrar el conjunto no dominado de soluciones

1. Hacer $i=1$
2. Para todos los $j \neq i$, comparar las soluciones $x^{(i)}$ y $x^{(j)}$ para determinar dominancia, usando las 2 condiciones mencionadas anteriormente para todos los M objetivos.
3. Si para algún j , $x^{(i)}$ es dominado por $x^{(j)}$, marcar $x^{(i)}$ como dominado. Incrementar i en uno e ir al paso 2.
4. Si todas las soluciones (es decir, cuando se llega a $i=j$) en el conjunto son consideradas, ir al paso 5; de lo contrario incrementar i en uno e ir al paso 2.
5. Todas las soluciones que no son marcadas como dominadas son soluciones no-dominadas.

Cuando se realiza un análisis de dominancia entre dos soluciones y se encuentra que la primera condición de dominancia no se cumple para ninguna de las dos soluciones, no se puede concluir acerca de la dominancia de una con respecto a otra. Cuando esto sucede, se dice que las soluciones son no-dominadas. De esta forma, si se tiene un conjunto finito de soluciones y se realiza una comparación de todos los pares posibles, al final se va a tener un conjunto de soluciones que son no dominadas entre sí y dicho conjunto tiene la propiedad de dominar al resto de soluciones que no pertenezcan a él. Por lo tanto, si se tiene un conjunto de soluciones P , el conjunto no dominado de soluciones P' lo forman aquellas que no son dominadas por ningún miembro del conjunto P , a este conjunto se le llama frente de Pareto. Cuando el conjunto P es el espacio de búsqueda, el conjunto no dominado P' resultante es denominado frente óptimo de Pareto [2-3].

En la figura 1 se muestran los conjuntos óptimos de Pareto para diferentes escenarios con dos objetivos y para el mismo espacio de soluciones. En cualquier caso el óptimo de Pareto siempre está compuesto por soluciones ubicadas en el borde de la región factible del espacio de soluciones.

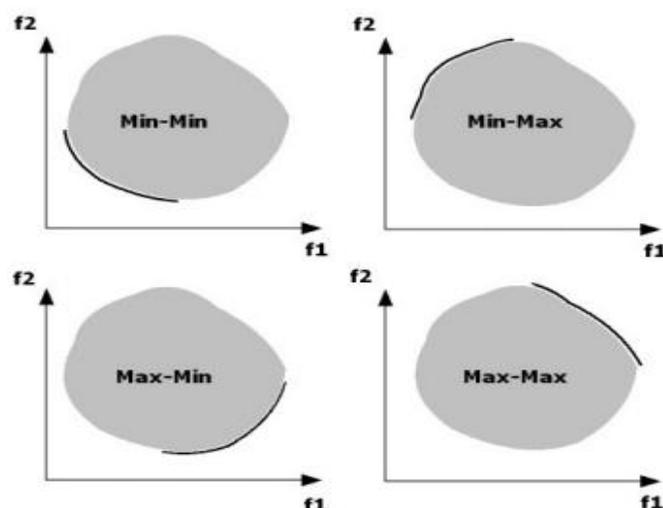


Figura 1. Frentes Óptimos de Pareto para el mismo espacio de soluciones.

Una población puede ser clasificada en diferentes niveles de no dominancia. Cuando el procedimiento de 5 pasos descrito para encontrar el conjunto no dominado es aplicado por primera vez en una población, el conjunto resultante es el conjunto no dominado de mejor nivel (primer frente de Pareto). Para obtener otras clasificaciones, estas soluciones no dominadas pueden ser temporalmente omitidas del conjunto original para aplicar nuevamente el procedimiento. Lo que resulta es un conjunto no dominado de soluciones de segundo nivel (o el siguiente mejor nivel). Este proceso puede ser repetido hasta que todos los miembros de la población sean clasificados dentro de un nivel o frente de Pareto.

Uno de los objetivos de la optimización para problemas MO es encontrar tantas soluciones Pareto-óptimas como sea posible. Dado que los algoritmos evolutivos (EA por sus siglas en inglés) utilizan una población de soluciones, se pueden hacer algunos cambios a estos algoritmos de tal forma que tras su ejecución se puedan encontrar soluciones no-dominadas de buena calidad. Con el objeto de

desarrollar la anterior idea se describe a continuación un algoritmo elitista para solucionar problemas MO.

1.4.2. Algoritmo NSGA-II

El NSGA-II (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) fue propuesto por Deb y sus estudiantes en el año 2000 [3]. En este algoritmo, la población descendiente Q_t (tamaño N) es creada en primera instancia usando la población de padres P_t (tamaño N).

Después de esto, las dos poblaciones son combinadas para formar R_t de tamaño $2N$. Después de lo anterior, mediante un ordenamiento no dominado se clasifica la población R_t en diferentes frentes de Pareto. Aunque esto requiere un mayor esfuerzo, se justifica por el hecho de permitir una verificación global de dominancia entre la población de padres y descendientes. Una vez el proceso de ordenamiento no dominado ha finalizado, la nueva población es generada a partir de las configuraciones de los frentes no dominados. Esta nueva población empieza a ser construida con el mejor frente no dominado (F_1), continúa con las soluciones del segundo frente (F_2), tercero (F_3) y así sucesivamente. Como la población R_t es de tamaño $2N$, y solamente existen N configuraciones que conforman la población descendiente, no todas las configuraciones de los frentes pertenecientes a la población R_t podrán ser acomodados en la nueva población. Aquellos frentes que no pueden ser acomodados desaparecen [3].

Cuando se está considerando el último frente, las soluciones que hacen parte de éste pueden exceder las restantes por acomodar en la población descendiente, dicha situación se ilustra en la figura 2. En este caso resulta útil emplear alguna estrategia que permita seleccionar las configuraciones situadas en un área poco poblada (alejada de otras soluciones) para llenar las posiciones restantes de la población descendiente a cambio de optar por escoger configuraciones de forma aleatoria.

Lo anterior es poco relevante en los primeros ciclos generacionales del algoritmo, ya que en esta etapa existen muchos frentes que sobreviven hacia la siguiente

generación, pero a medida que el proceso avanza, muchas configuraciones pasan a ser parte del primer frente inclusive haciendo que dicho frente tenga más de N individuos, por lo que se hace importante que las configuraciones no rechazadas sean de buena calidad y escogidas mediante una metodología que garantice la diversidad. La idea es que siempre se promuevan las configuraciones que aseguren diversidad dentro del mismo frente de Pareto. Cuando la población en su totalidad converge al frente de Pareto óptimo, el algoritmo asegura que las soluciones estén distanciadas una de otra.

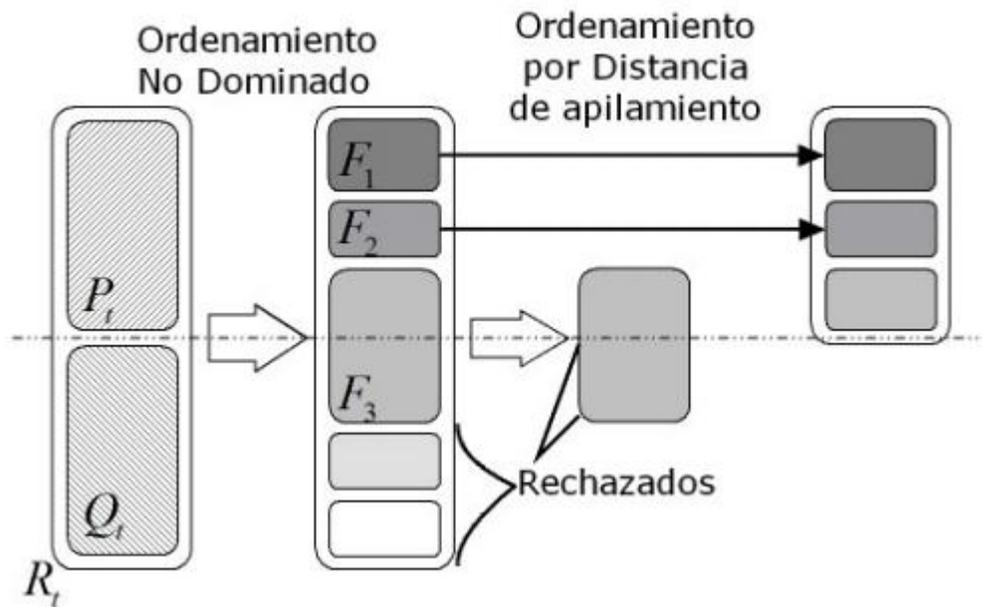


Figura 2. Diagrama esquemático del mecanismo de promoción de individuos del NSGA-II

En el algoritmo NSGA-II inicialmente se crea una población (aleatoria o mediante una técnica de inicialización) de padres P_0 . La población se ordena de acuerdo a los niveles de no dominancia (ordenamiento de los frentes de Pareto, F_1, F_2, \dots). A cada solución se le asigna una función fitness de acuerdo a su nivel de no dominancia (1 es el mejor nivel) y se entiende que durante el proceso de debe disminuir dicha función. La selección por torneo (empleando un operador de torneo para apilamiento, descrito posteriormente), el cruzamiento y la mutación

son utilizadas para crear la población de descendientes Q_0 de tamaño N . Los principales pasos del algoritmo NSGA-II son descritos a continuación:

1. Combinar las poblaciones de padres y descendientes para crear $R_t = P_t \cup Q_t$
Realizar el ordenamiento no dominado a R_t e identificar los frentes F_i , $i=1,2,\dots,$ etc.
2. Hacer $P_{t+1} = \emptyset$, e $i=1$. Mientras $|P_{t+1}| + |F_i| < N$ hacer $|P_{t+1}| = |P_{t+1}| \cup |F_i|$ e $i=i+1$.
3. Realizar ordenamiento por apilamiento ($F_i' < C$ descrito posteriormente) e incluir en P_i las $N - |P_{t+1}|$ soluciones más esparcidas usando los valores de distancia de apilamiento asociadas al frente F_i .
- 3.4. Crear la población descendiente Q_{i+1} a partir de P_{i+1} usando selección por torneo para apilamiento, cruzamiento y mutación.

1.4.3 Algoritmo NSGA-II modificado

Como propuesta alternativa, se plantea el algoritmo NSGA-II, incluyendo una variante para reducir el tiempo computacional. Como se ha visto, el NSGA-II crea una población de descendientes de tamaño N , para después ser combinada con la población de padres P , lo que implica que por cada ciclo generacional se deben realizar por lo menos N evaluaciones de la función objetivo. Para reducir este inconveniente se puede importar la lógica del Algoritmo Genético de Chu-Beasley (CBGA) que solamente introduce un individuo a la población por cada ciclo generacional, disminuyendo sustancialmente el esfuerzo computacional [5]. Dicha lógica implementada sobre el NSGA-II consiste en que la población descendiente es reemplazada por un solo individuo, resultante del operador cruzamiento, que es posteriormente sometido a mutación para ser incluido en la población total R . Para este caso la población R tendrá tamaño $N+1$ (al contrario del planteamiento original en donde el tamaño es $2N$) y de cumplir con las condiciones necesarias de optimalidad de Pareto el individuo será promovido hacia el siguiente ciclo generacional como miembro de la población P .

CAPÍTULO 2. DISEÑO ÓPTIMO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA DE SUBESTACIONES

2.1 Introducción

El desarrollo alcanzado por los sistemas de cómputo, ha permitido la implementación de programas para el proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra, basados en algoritmos matemáticos de gran exactitud desarrollados hace muchos años, pero su complejidad impide su desarrollo y aplicación más extensiva, dando lugar a numerosos métodos aproximados, que si bien han garantizado resultados aceptables desde el punto de vista práctico, sus inherentes errores son razón suficiente que justifica no continuar aplicándolos.

El método de las imágenes de Maxwell aplicado al proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra, es un método que pudiera clasificarse como semiexacto, que permite el diseño de sistemas de gran complejidad considerando tanto la existencia de terrenos de resistividad homogénea como de terrenos multiestratificados, garantizando niveles de exactitud que comparados por ejemplo con el método propuesto por la IEEE para el diseño de mallas de tierra de subestaciones, en su norma STD 80 del 2000, en dependencia de las dimensiones de la malla puede reducir errores de hasta un 20%. Por otra parte este método de la IEEE realiza el diseño solo de mallas rectangulares de reticulado uniforme en toda su área.

2.2 Implementación del método de correlación de soluciones cuasi-exactas de optimización en el Programa PAST

2.2.1 Determinación de la cantidad de conductores en el diseño de una malla

Es conveniente seguir algunas pautas generales para diseñar una malla de tierra en cuanto a la cantidad de módulos a utilizar en cada dirección. El objetivo principal es que la malla cumpla con el requisito de poseer en su interior niveles de tensión de paso (U_{paso}) y de contacto (U_{cont}) inferiores a los tolerables (U_{tol}), pero no demasiado inferiores, para no realizar un proyecto sobredimensionado con costos muy superiores a los necesarios. Además, el valor aceptable de solicitación máxima debe obtenerse con un diseño que minimice el costo de construcción.

Considerando que el diseño de la malla está determinado por las tensiones de contacto, el primer paso es determinar el valor tolerable correspondiente. Para ello se suponen conocidos el tiempo de duración de la falla, la resistividad del estrato superior del terreno y del material artificial agregado, este último se puede asumir con un valor normal de $3000 \Omega \cdot m$. A continuación, deben definirse la profundidad de enterramiento y el diámetro del conductor empleado. También, dependiendo del tamaño de la malla, debe tenerse presente a priori si se complementará o no el diseño utilizando barras verticales o elementos adicionales en los módulos esquinas de la malla.

El paso siguiente es a partir de una configuración inicial estimada, solo utilizando elementos horizontales, sin barras; por ejemplo una configuración básica perimétrica, que abarque el área a proteger. A continuación, se incrementa en forma adecuada la cantidad de conductor de la malla hasta obtener el valor de solicitación aceptable. La figura 2.1 muestra este proceso. [11]

En este sentido es bueno señalar algunas consideraciones importantes: Para similares longitudes de conductor total, las configuraciones con módulos alargados en las direcciones del lado mayor o menor de la malla, tienen menores valores de solicitación que las configuraciones con módulos más cuadrados. En mallas de

dimensiones medianas a mayores, las barras no son una solución económica para reducir las solicitaciones de tensión. Lo anterior es válido, en mayor medida, si se trata de terrenos homogéneos. Para un terreno estratificado con capas inferiores de menor resistividad que la que contiene a los conductores y alcanzables con las barras, el efecto reductor en las tensiones de paso y contacto puede ser importante ya que contribuye a disminuir el potencial de la malla.

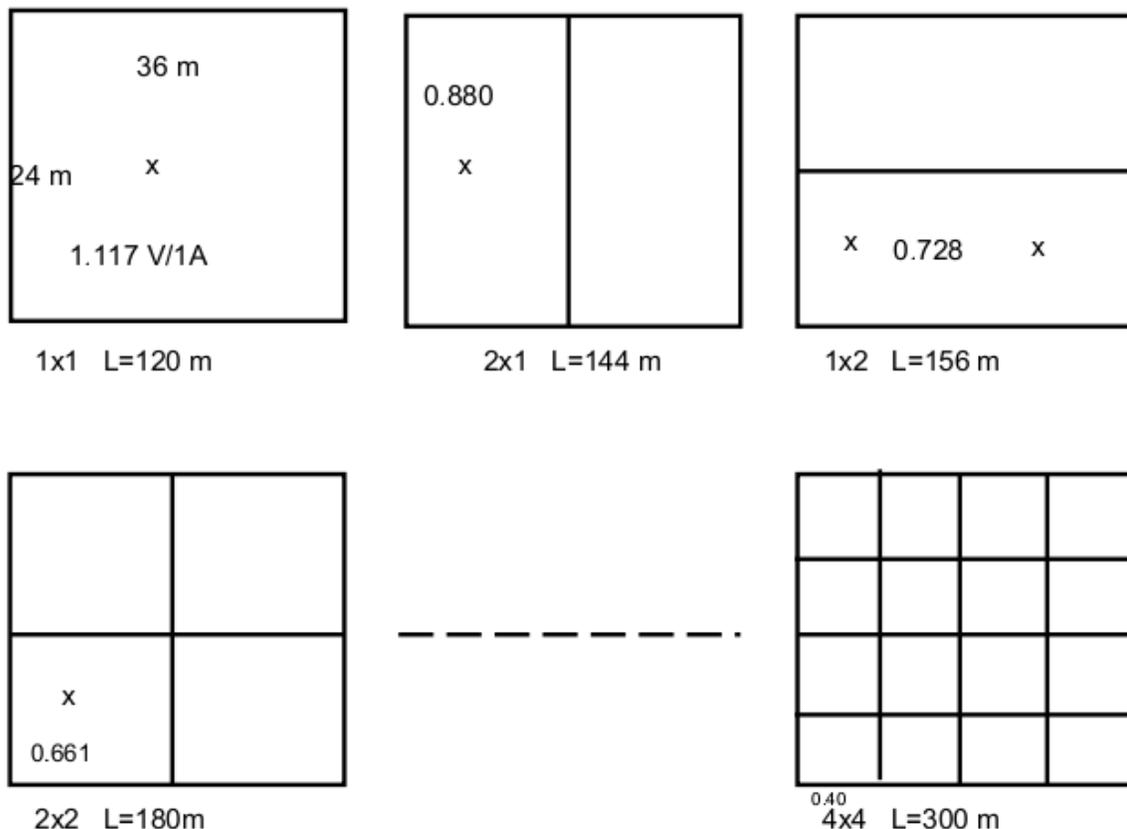
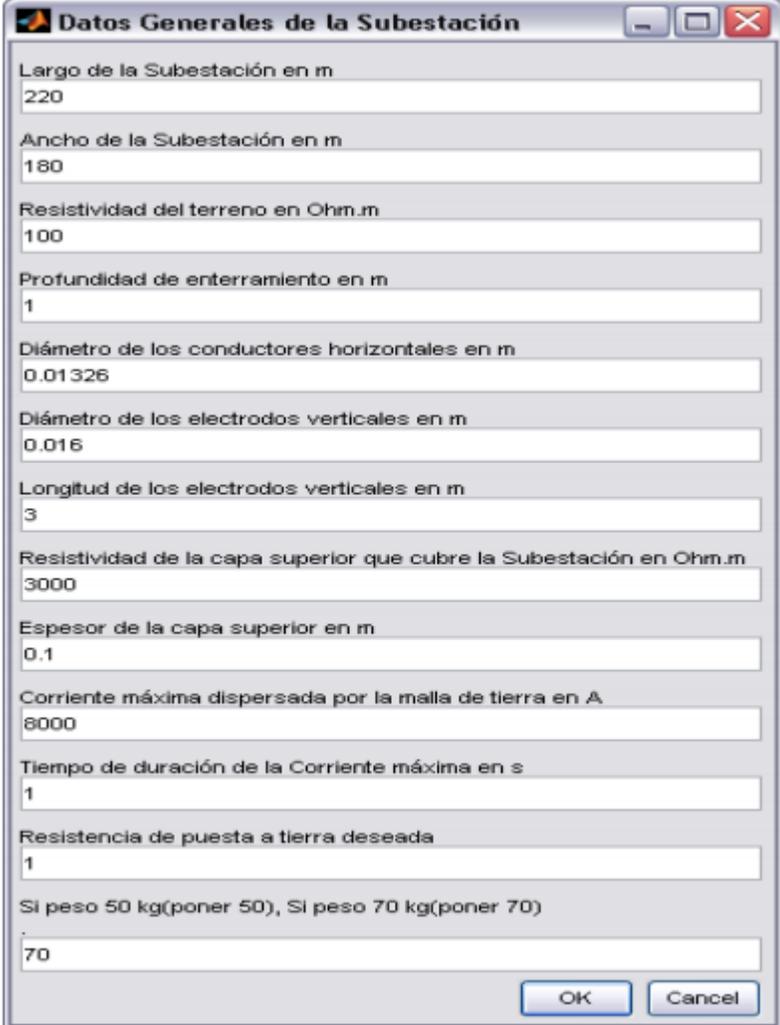


Figura 2.1 Tensión de contacto en V/1A para distintas configuraciones.

O sea, el proceso de optimización se inicia con la obtención de la malla de reticulado uniforme, la cual se logra con la menor cantidad de conductores que garantizan una resistencia por debajo de la deseada y potenciales de paso y de contacto inferiores a los tolerables, por ejemplo para los datos iniciales que se

muestran en la figura 2.2, se obtiene la malla de reticulado uniforme mostrada en la figura 2.3, con un total de 3360 m de conductor.

La figura 2.4 muestra los potenciales de contacto en la malla de reticulado uniforme. Como se observa los potenciales de contacto máximo en los módulos no es uniforme, siendo mayor en los módulos esquina y disminuyendo hacia el centro. Esta no uniformidad, es lo que permite redistribuir los conductores, de adentro hacia fuera y lograr eliminar conductores y en consecuencia reducir la longitud total de conductor, o sea optimizar la malla de reticulado uniforme en cuanto a longitud de conductor.



The image shows a software dialog box titled "Datos Generales de la Subestación". It contains several input fields with the following values:

Parámetro	Valor
Largo de la Subestación en m	220
Ancho de la Subestación en m	180
Resistividad del terreno en Ohm.m	100
Profundidad de enterramiento en m	1
Diámetro de los conductores horizontales en m	0.01326
Diámetro de los electrodos verticales en m	0.016
Longitud de los electrodos verticales en m	3
Resistividad de la capa superior que cubre la Subestación en Ohm.m	3000
Espesor de la capa superior en m	0.1
Corriente máxima dispersada por la malla de tierra en A	8000
Tiempo de duración de la Corriente máxima en s	1
Resistencia de puesta a tierra deseada	1
Si peso 50 kg(poner 50), Si peso 70 kg(poner 70)	70

At the bottom right of the dialog box are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 2.2. Datos iniciales.

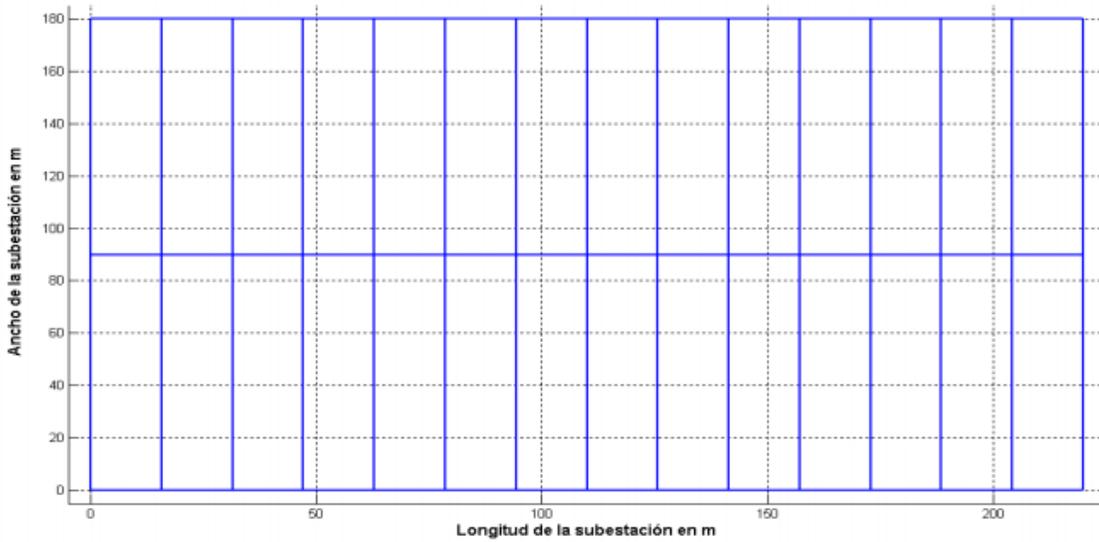


Figura 2.3. Malla de reticulado uniforme.

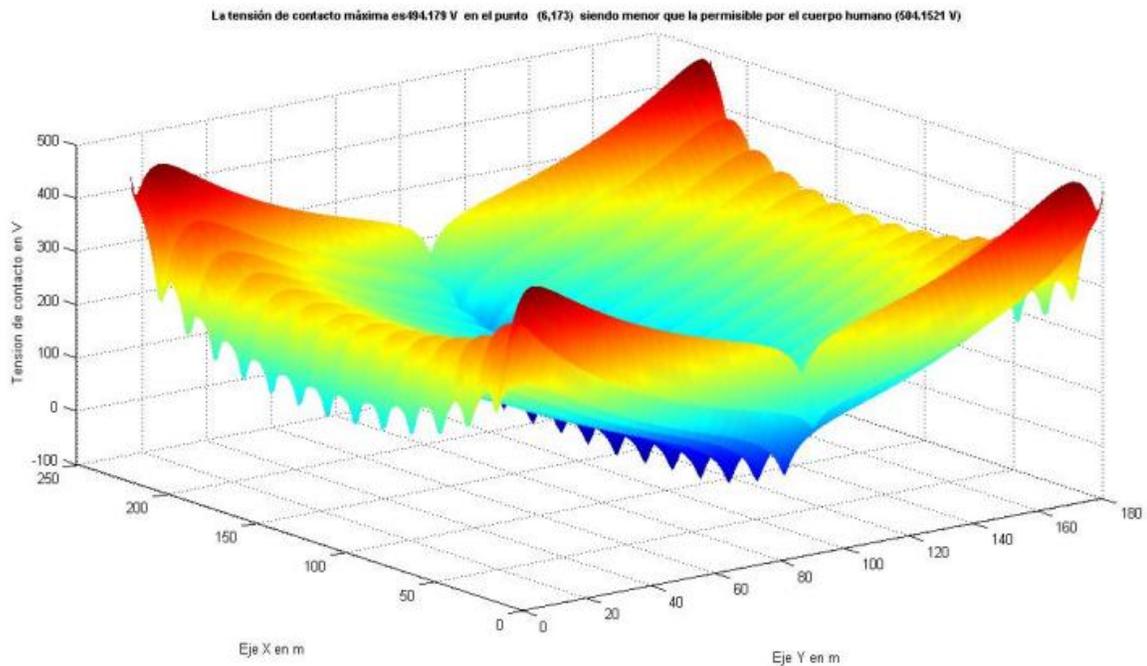


Figura 2.4. Tensiones de contacto en la malla de reticulado uniforme.

2.2.2 Optimización de mallas de puesta a tierra

Anteriormente se indicó la forma más conveniente de diseñar una malla en forma rectangular que tiene sus conductores separados a igual distancia en cada

dirección. El proceso consiste en ir aumentando en incrementos mínimos la cantidad total de conductor de la malla, de manera que cada nuevo incremento sea con la variante de menor cantidad de conductor total, hasta que se satisfaga el requerimiento de $U_{cont} \leq U_{tol}$. Esta forma inicial de diseño puede considerarse como una primera etapa o fase de un proceso global de optimización. Las mallas así diseñadas presentan tensiones de paso y de contacto que son mayores en los módulos esquinas y decrecen hacia el interior, lo que significa sobredimensionar una cantidad importante de éstas. Por tanto, la segunda fase del proceso de optimización consiste en disponer los conductores de la malla obtenida en la primera fase, de tal manera que las tensiones sean, en una situación ideal, iguales en todos los módulos.

El objetivo de esta segunda fase de optimización es reducir aún más la cantidad total de conductor y excavaciones de la malla para una misma solicitud máxima, o lo que es equivalente, minimizar la solicitud máxima para una determinada cantidad de conductor de la malla. En la figura 2.5 se esquematizan estas formas de optimizar. La configuración de a), es una solución obtenida de la primera fase de optimización que satisface la condición de U_{tol} . En b) se consigue reducir la cantidad total de conductor de la malla en 9%, incluso reduciendo un poco la solicitud máxima. Si la solicitud máxima de a) (0.421 V/1A) no hubiera llegado a cumplir con el requerimiento de U_{tol} , es posible disminuir este valor en 13%, con una separación irregular de los mismos conductores, como se muestra en c). [10] [11]

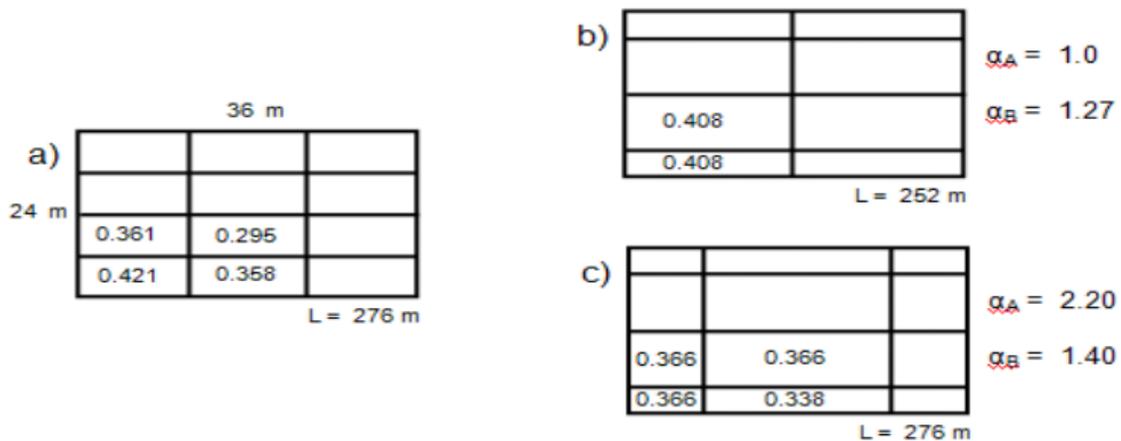


Figura 2.5. Forma de optimizar una malla mediante separación irregular de sus conductores.

El problema básico de solución óptima de una malla de tierra irregular es determinar la separación que debe existir entre los distintos conductores de una malla, en cada dirección, de manera que las tensiones máximas de contacto y de paso en su interior sean iguales. Sin embargo, salvo configuraciones de mallas muy simples, no es posible lograr la situación ideal en que todos los módulos posean la misma tensión máxima y, por tanto, debe aceptarse una solución que sea lo más cercana posible a esa condición. Un método simple, basado en procesos exactos de optimización de mallas de tierra regulares, se muestra a continuación. Para ello se ha elegido de forma arbitraria una función de potencia, del tipo mostrado en la figura 2.6, que representa la ubicación de los elementos de una malla. De este modo, se definen $F(i)$ y $F(j)$ como los valores en p.u de ubicación en una columna i o fila j de elementos; donde N_m es el número de módulos del lado en cuestión y α es un parámetro a determinar para cada lado, obtenido de una correlación de soluciones cuasi-exactas de optimización. En términos generales, la función elegida para representar la ubicación de los elementos podría ser otra, o incluso podría ser una función mixta o no continua.

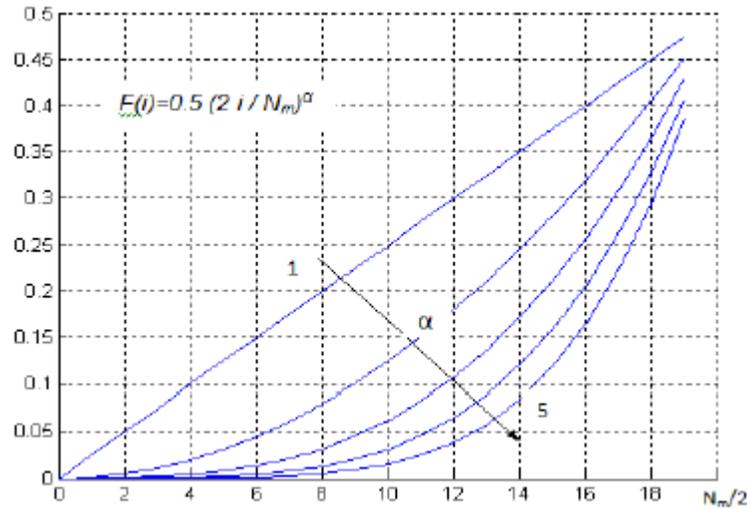


Figura 2.6. Función de ubicación de los elementos de una malla de tierra.

Así, sobre la base de la función elegida, la ubicación en el eje X de cada columna de elementos de longitud B, de la malla irregular de la figura 2.7, es:

$$x(i) = 0.5 A (2 i / NmA) \alpha A$$

$$i = 0,1,2,3,\dots,\text{ENT}(NmA/2) \quad (2) \quad x(NmA-i) = A - x(i) \quad (3)$$

En forma similar, la ubicación en el eje Y de cada fila de elementos de longitud A, es:

$$y(j) = 0.5 A (2 j / NmB) Ab \quad (4)$$

$$j = 0,1,2,3,\dots,\text{ENT}(NmB/2) \quad (5) \quad y$$

$$(NmB-j) = A - y(j) \quad (6)$$

Los valores de αA y αB se determinan de soluciones de correlaciones de soluciones cuasi-exactas de optimización, para mallas con distintas dimensiones, números de módulos y relaciones de lados. [10] [11]

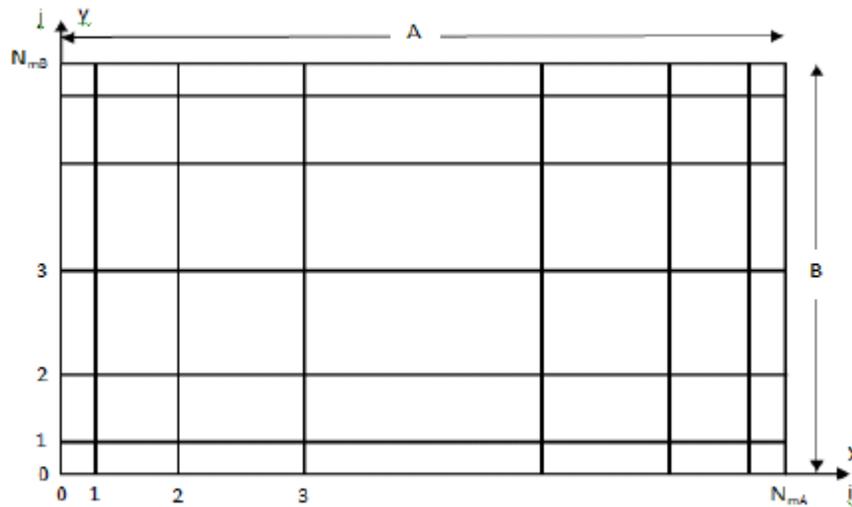


Figura 2.7. Malla de tierra con separación irregular de conductores.

2.2.3 Valores de αA y αB para una malla rectangular

Los valores de αA y αB , indicados a continuación, se han obtenido de correlaciones de resultados de cuasi-optimización de mallas rectangulares para diferentes tamaños, número de módulos y relaciones de lados.

Para el lado mayor A:

$$\alpha A = \alpha_0 (0.685 e^{0.378 K}) \quad (7)$$

Para el lado menor B:

$$\alpha B = \alpha_0 (1 - 0.0789 \ln K) \quad (8)$$

Donde α_0 es el valor de α correspondiente a una malla cuadrada de área $A \times B$:

$$\alpha_0 = 1.154 + 0.170 \ln N_m + 0.0445 \ln \quad (9)$$

$$\text{Donde: } K = A/B \quad (10) \quad N_m = (N_{mA} + N_{mB}) / 2 \quad (11)$$

Los coeficientes 1.154, 0.170 y 0.0445 de la expresión 9, obtenidos de las correlaciones de resultados de cuasi-optimización de mallas rectangulares, no dan una solución realmente óptima para mallas de diferentes tamaños. Una solución a este problema puede ser la búsqueda de coeficientes particulares para cada malla

en específico a través de un proceso de minimización de las diferencias entre los máximos de los diferentes módulos que componen la malla, donde estos coeficientes son las variables de la función de optimización. Con este objetivo se usó la función `fminsearch` del MatLab.

La obtención de la malla optimizada parte de determinar la distribución de conductores, tanto por el eje Y como por el eje X, que garantiza valores similares de tensión de contacto máxima en cada uno de los módulos de la malla, para las condiciones iniciales de profundidad de enterramiento y sección del conductor. La figura 2.8 muestra la malla así obtenida del ejemplo anterior.

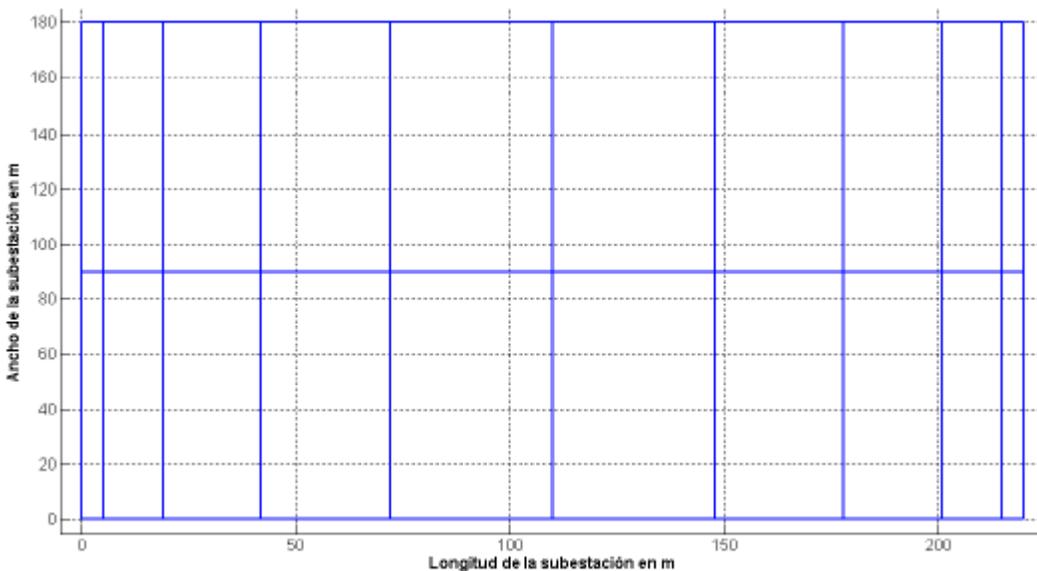


Figura 2.8. Malla optimizado en longitud del conductor.

Como se observa se logran eliminar 4 conductores de 180 m de longitud para un total de 720 m, lo que representa una reducción del 21.4 % con respecto a la malla de reticulado uniforme. La figura 2.9 muestra los potenciales de contacto en la malla optimizada en longitud.

Una vez que se obtiene esta malla optimizada en longitud del conductor se procede a la optimización de la malla en profundidad de enterramiento de los conductores (o sea en cuanto a movimiento de tierra) y sección de los conductores, esto se hace a través de la minimización de una función de costo

que garantiza además tensiones de contacto y de paso por debajo de las tolerables y resistencia de conexión a tierra por debajo de la deseada. La figura 2.10 muestra los resultados de la malla así optimizada, donde se observa que la propuesta óptima propone una disminución en la profundidad de enterramiento de 1m hasta 0,73 m y un incremento del diámetro del conductor de 0.01326 m hasta 0.0201 m.

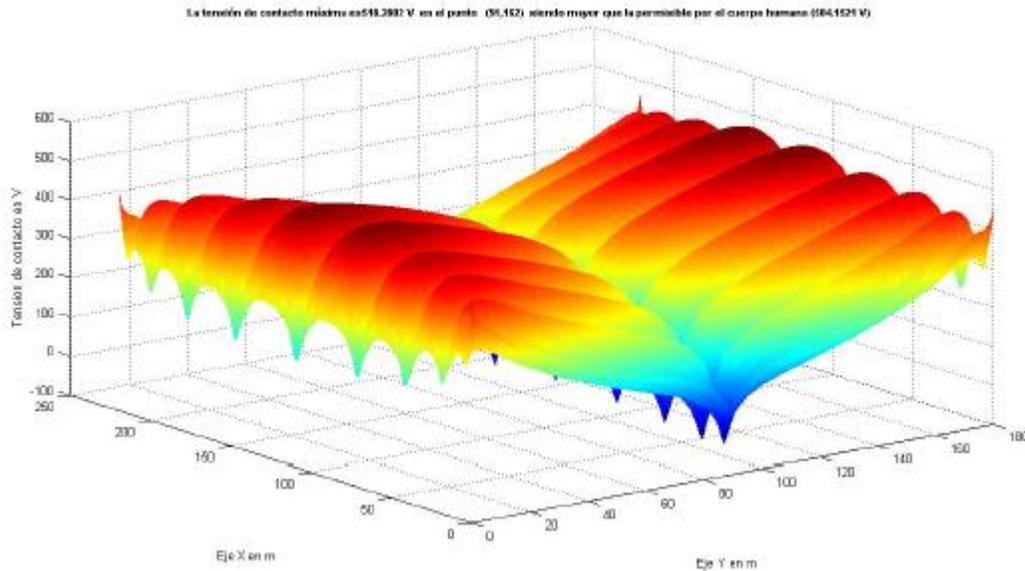


Figura 2.9. Tensiones de contacto en la malla optimizada.

2.2.4 Optimización de sección del conductor y profundidad de enterramiento

Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.25103
Número de Conductores Horizontales en el eje X	3
Número de Conductores Horizontales en el eje y	11
Diámetro de los conductores en m	0.020107
Número de Barras Verticales	0
Diámetro de las Barras en m	0.016
Profundidad de enterramiento en m	0.73387
Longitud total de cables en m	2640

Figura 2.10. Resultados de la optimización total.

La función de costo a minimizar (12) tiene en cuenta el incremento o decremento en costo por efecto del diámetro del conductor y el efecto de la profundidad de enterramiento.

$$(12) \quad Costo_{Total} = Costo_{conductor} \cdot Long_{conductor} + Costo_{mov} \cdot Prof \cdot Long_{conductor} \cdot 0.5$$

Donde:

CostoTotal = Costo total a minimizar.

Costoconductor = Costo del conductor en función de su diámetro.

Longconductor = Longitud total de conductor.

Costomov = Costo por el desplazamiento de un metro cúbico de tierra.

Prof = Profundidad de enterramiento.

0.5 es el ancho de la excavación a realizar.

Con este objetivo se usó la función `fmincon` del Matlab. En este caso se dan como restricciones el valor mínimo y máximo de sección del conductor y la profundidad mínima y máxima de enterramiento.

2.3. Implementación del algoritmo multiobjetivo NSGA-II

El algoritmo NSGA II, se encuentra disponible en internet, programado en MatLab. Este algoritmo permite encontrar una o más soluciones óptimas o sea permite una optimización multiobjetivo.

La función NSGA II parte de una serie de condiciones límites, en este caso:

- Diámetro mínimo y máximo permisible de los conductores horizontales.
- Profundidad mínima y máxima de enterramiento de los conductores.
- Coordenadas Y mínima y máxima de los conductores paralelos al eje X.
- Coordenadas X mínima y máxima de los conductores paralelos al eje Y.
- Cantidad minima y máxima de los conductores paralelos al eje X.
- Cantidad minima y máxima de los conductores paralelos al eje Y.

La función multiobjetivo a optimizar, tiene como parámetros a minimizar:

- La diferencia entre potencial de contacto máximo y el potencial de contacto tolerable
 $f1 = \text{abs}(U_{\text{maximo}} - U_{\text{mptol}});$
- La diferencia entre los potenciales maximos y minimos de los módulos de la malla.
 $f2 = \text{Dif_MaximosyMinimos};$

- Costo de la malla.

$$f3 = \text{Costoev} + \text{Costoeh} + \text{Costou} + \text{Costodt} + \text{Costohe};$$

Costoev: Costo de los electrodos verticales.

Cosroeh: Costo de los electrodos horizontales.

Costou: Costo de las uniones.

Costodt: Costo por desplazamiento de tierra.

Costohe: Costo por hincar electrodos verticales.

Además se dan como restricciones que la separación entre conductores debe ser mayor que 3 m y que la diferencia entre potencial de contacto máximo y el potencial de contacto tolerable sea mayor que cero.

La función devuelve como resultado el conjunto de variantes que cumpliendo con las restricciones, minimizan los valores de f_1 , f_2 y f_3 .

La figura 2.11 muestra las variaciones de f_1 , f_2 y f_3 para las mejores 100 variantes que cumplen todas las restricciones.

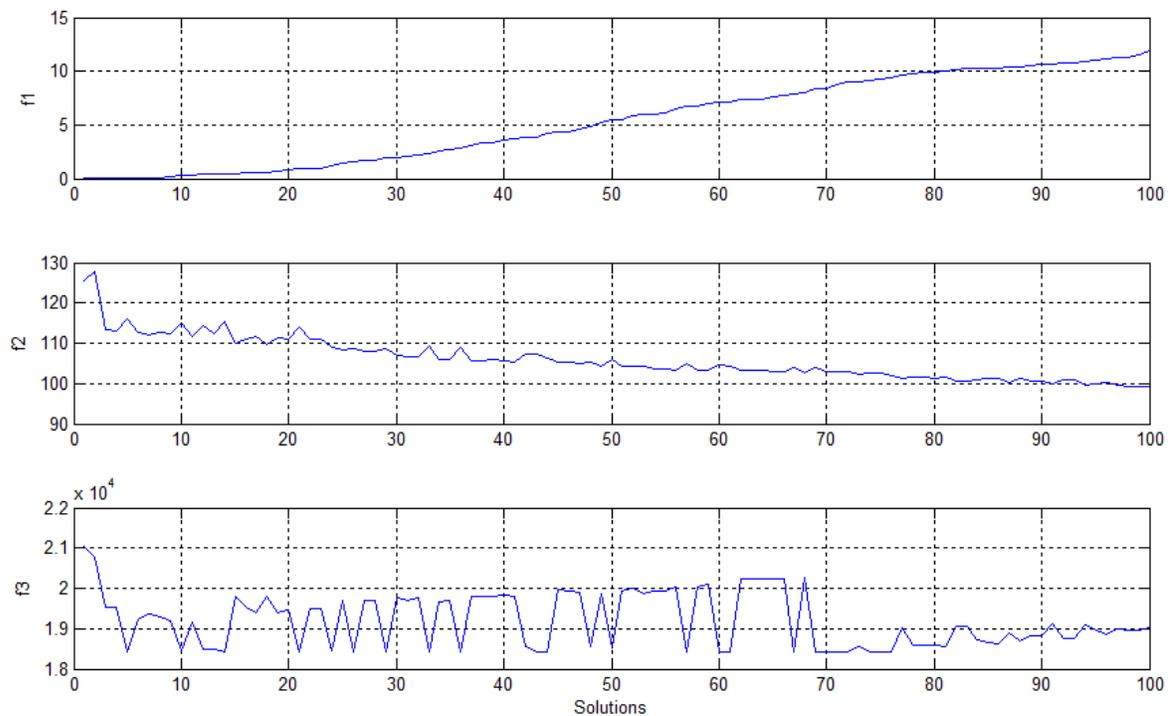


Figura 2.11. Variaciones de f_1 , f_2 y f_3 en las 100 mejores variantes ofrecidas por NSGA II.

En este caso las mejores variantes son la 5, la 10 y la 14. Para el caso de la variante 5, se dan los valores de f_1 , f_2 , f_3 , n_x (numero de conductores paralelos al eje X), n_y (numero de conductores paralelos al eje Y), d_c (radio de los conductores

horizontales), t (profundidad de enterramiento) y las coordenadas Y de los conductores paralelos al eje X .

Variante 5

$$f1 = 0.024317$$

$$f2 = 115.949$$

$$f3 = 10307.6$$

$$g = 0$$

$$nx = 11$$

$$y = 3$$

$$dc = 0.0053 \text{ m}$$

$$t = 0.5 \text{ m}$$

$$y = 5.4508 \quad 14.8214 \quad 28.5984 \quad 61.0859 \text{ m}$$

CAPÍTULO 3. COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

3.1. Introducción

Para la comparación entre el método del PAST que utiliza el proceso de cuasi-optimización y el algoritmo multiobjetivo NSGA II, se utilizan dos mallas de reticulado uniforme una de 50 x 40 m de área y otra de 220 x 180 metros. Las figuras 3.1 y 3.2 muestran la configuración de cada una de ellas.

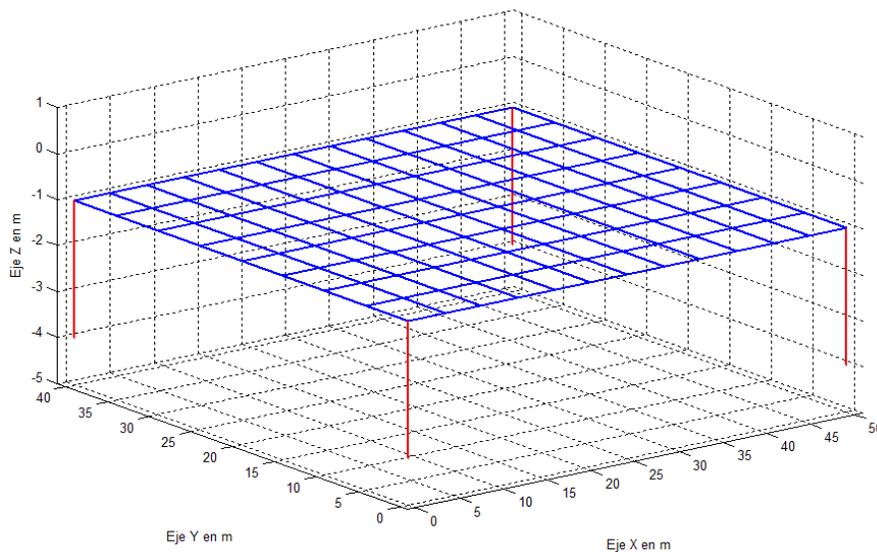


Figura 3.1. Malla de 50 x 40 m, de reticulado uniforme.

Las Figuras 3.3 y 3.2 muestran los datos generales de ambas mallas, cuyos datos generales se muestran en las figuras 3.3 y 3.4. Los resultados luego de ejecutado el PAST se muestran en las figuras 3.5 y 3.6.

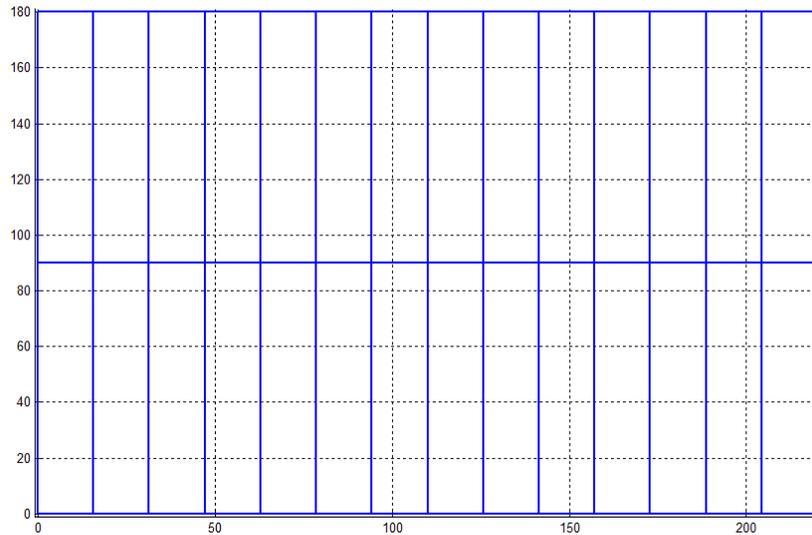


Figura 3.2. Malla de 220 x 180 m, de reticulado uniforme.

Parámetro	Valor
Resistividad del Terreno en Ohm.m	100
Numero de Conductores Horizontales por eje X	9
Numero de Conductores Horizontales por eje y	13
Numero de Conductores en ángulo	0
Diametro de los conductores en m	0.01326
Numero de Barras Verticales	4
Diametro de las Barras en m	0.02
Corriente máxima inyectada en el terreno en A	3000
Tiempo de duración de la corriente en s	1
Resistividad de la capa superficial Ohm.m	3000
Espesor de la capa superficial en m	0.15
Si peso 50 kg(poner 50), Si peso 70 kg(poner 70)	70

Figura 3.3 Datos generales de la malla de 50 x 40 m.

Datos Generales del Sistema

Resistividad del Terreno en Ohm.m
100

Numero de Conductores Horizontales por eje X
3

Numero de Conductores Horizontales por eje y
15

Numero de Conductores en ángulo
0

Diametro de los conductores en m
0.01326

Numero de Barras Verticales
0

Diametro de las Barras en m
0.016

Corriente máxima inyectada en el terreno en A
8000

Tiempo de duración de la corriente en s
1

Resistividad de la capa superficial Ohm.m
3000

Espesor de la capa superficial en m
0.1

Si peso 50 kg(poner 50), Si peso 70 kg(poner 70)
70

OK Cancel

Figura 3.4 Datos generales de la malla de 220 x 180 m

Resultados finales

Resistencia de Puesta a tierra en Ohm
0.97834

Numero de Conductores Horizontales en el eje X
9

Numero de Conductores Horizontales en el eje y
13

Diametro de los conductores en m
0.01326

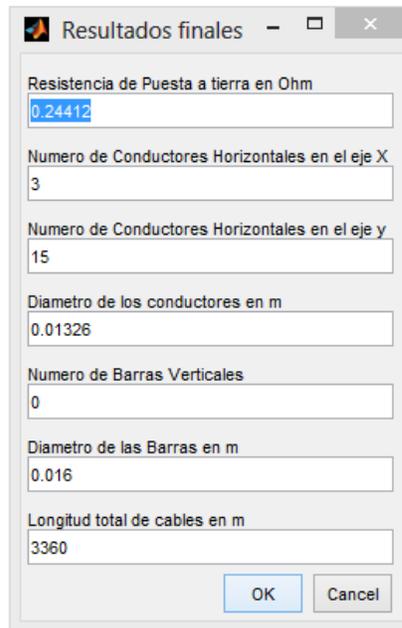
Numero de Barras Verticales
4

Diametro de las Barras en m
0.02

Longitud total de cables en m
970

OK Cancel

Figura 3.5 Resultados de la malla de 50 x 40 m.



Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.24412
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	3
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	15
Diametro de los conductores en m	0.01326
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0.016
Longitud total de cables en m	3360

Figura 3.6 Resultados de la malla de 220 x 180 m

La tensión de contacto máxima es 583.8762 V en el punto (0,0) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (633.7472 V) para una tensión de la malla de 2935.0349 V

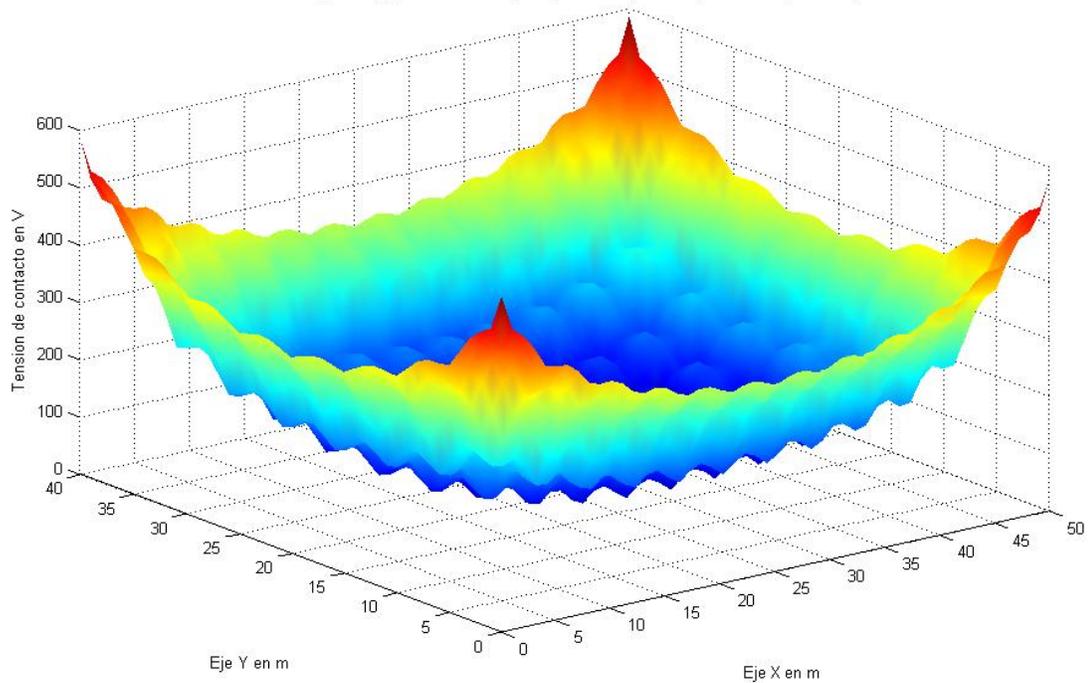


Figura 3.7. Potenciales de contacto de la malla de 50 x 40 m.

La tensión de contacto máxima es 494.179 V en el punto (6,173) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (504.1521 V) para una tensión de la malla de 1952

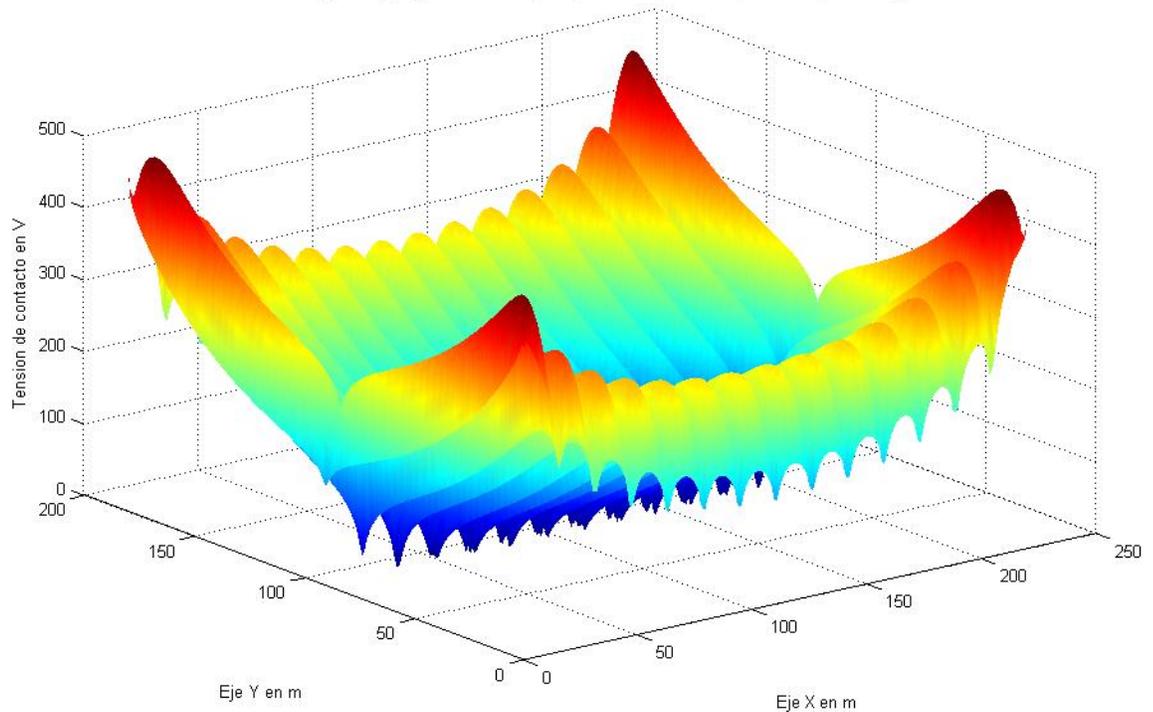


Figura 3.8. Potenciales de contacto de la malla de 220 x 180 m.

Como se puede apreciar en las figuras 3.7 y 3.8, los potenciales de contacto máximo en ambas mallas se dan en los módulos esquinas, siendo los potenciales en el interior de las mallas muy bajos, esto sugiere que el número de conductores puede ser menor, tanto por un eje como por el otro. Se puede apreciar también que en ambos casos los potenciales de contacto máximo son inferiores a los tolerables por el cuerpo humano.

3.2. Optimización de la malla de 50 x 40 m por el método del PAST

Al someter la malla de 50 x 40 a un proceso de optimización por el método implementado en el PAST, se obtiene la malla que se muestra en la figura 3.9, cuyo valor de resistencia y otros datos se muestra en la figura 3.10. En la figura 3.11 se muestran sus potenciales de contacto, que como se puede apreciar presentan una mayor uniformidad en todos los módulos, un balance económico de esta malla se muestra en la figura 3.12.

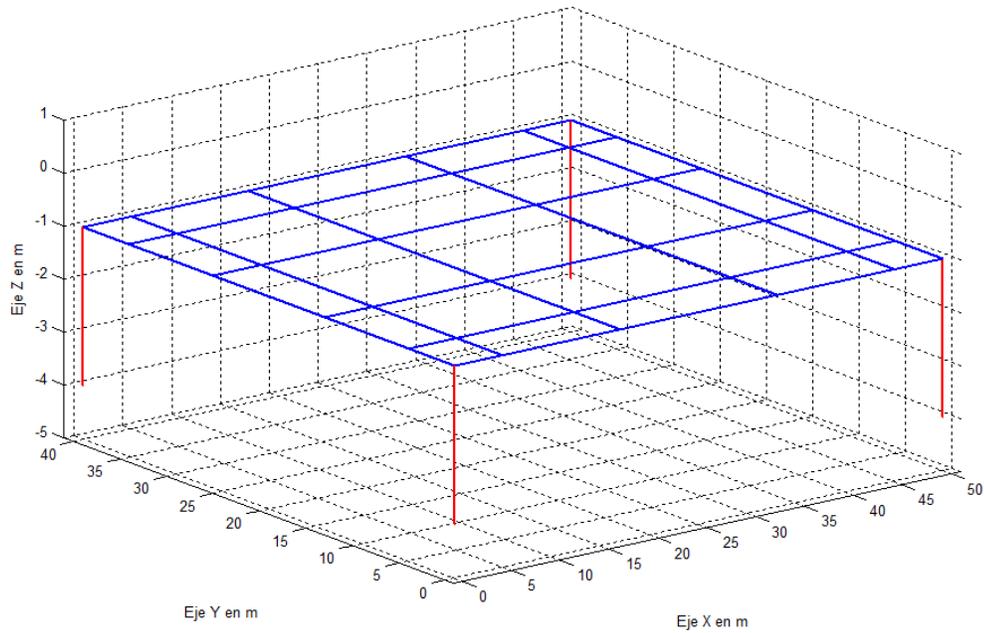


Figura 3.9. Malla de 50 x 40 m optimizada por el PAST.

A screenshot of a software dialog box titled 'Resultados finales'. It contains several input fields with the following values:

Parameter	Value
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	1.00
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	6
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	6
Diametro de los conductores en m	0.02641
Numero de Barras Verticales	4
Diametro de las Barras en m	0.02
Longitud total de cables en m	540

At the bottom right, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 3.10. Resultados de la malla optimizada de 50 x 40 m.

La tensión de contacto máxima es 562.8759 V en el punto (0,0) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (633.7472 V) para una tensión de la malla de 3020.865 V

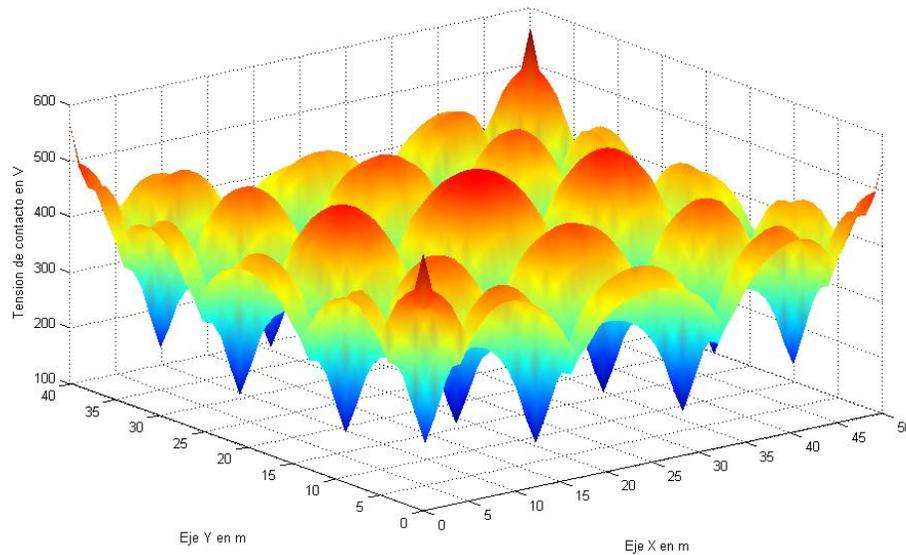


Figura 3.11. Potenciales de contacto de la malla optimizada de 50 x 40 m.

Esta es una captura de pantalla de una ventana de software titulada "Resultados económicos". La ventana contiene los siguientes campos de texto con sus respectivos valores:

Descripción	Valor
Costo de los electrodos verticales (\$)	84
Costo de los conductores horizontales (\$)	2160
Costo de las uniones (\$)	72
Costo por desplazamiento de tierra (\$)	1350
Costo de hincar electrodos verticales	20
El costo total de la instalación es aproximadamente de (\$)	3686

En la parte inferior de la ventana hay dos botones: "OK" y "Cancel".

Figura 3.12. Balance económico de la malla optimizada de 50 x 40 m.

3.3. Optimización de la malla de 220 x 180 m por el método del PAST

Al someter la malla de 220 x 180 a un proceso de optimización por el método implementado en el PAST, se obtiene la malla que se muestra en la figura 3.13, cuyo

valor de resistencia y otros datos se muestra en la figura 3.14. En la figura 3.15 se muestran sus potenciales de contacto, que como se puede apreciar presentan una mayor uniformidad en todos los módulos, un balance económico de esta malla se muestra en la figura 3.16.

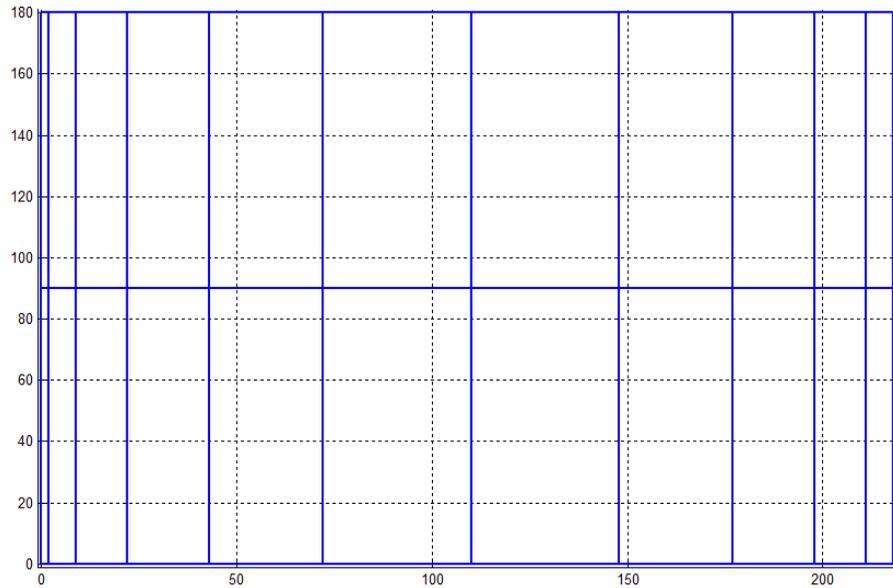


Figura 3.13. Malla de 220 x 180 m optimizada por el PAST.

Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.25103
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	3
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	13
Diametro de los conductores en m	0.016595
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0.016
Longitud total de cables en m	3000

Figura 3.14. Resultados de la malla optimizada de 220 x 180 m.

La tensión de contacto máxima es 521.5542 V en el punto (91,163) siendo mayor que la permisible por el cuerpo humano (504.1521 V) para una tensión de la malla de 2008.2499 V

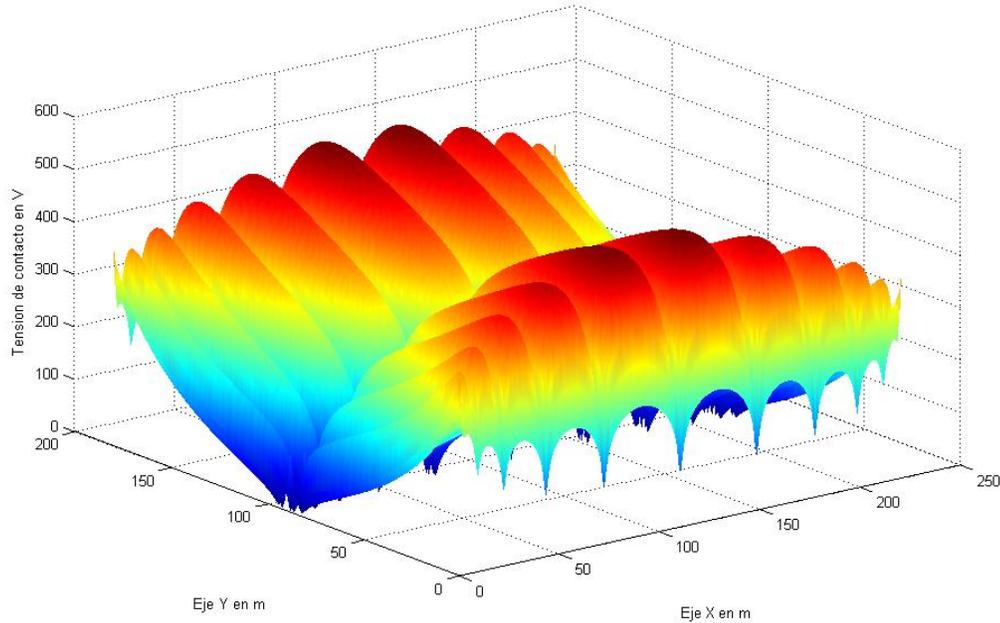


Figura 3.15. Potenciales de contacto de la malla optimizada de 220 x 180 m.

Resultados económicos	
Costo de los electrodos verticales (\$)	0
Costo de los conductores horizontales (\$)	12000
Costo de las uniones (\$)	78
Costo por desplazamiento de tierra (\$)	4261.3534
Costo de hincar electrodos verticales	0
El costo total de la instalación es aproximadamente de (\$)	16339.3534
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Figura 3.16. Balance económico de la malla optimizada de 220 x 180 m.

3.4. Optimización de la malla de 50 x 40 m por el método de la NSGA II

Al someter la malla de 50 x 40 a un proceso de optimización por el método de la NSGA II, se obtiene la malla que se muestra en la figura 3.17, cuyo valor de resistencia y otros

datos se muestra en la figura 3.18. En la figura 3.19 se muestran sus potenciales de contacto, que como se puede apreciar presentan una mayor uniformidad en todos los módulos, un balance económico de esta malla se muestra en la figura 3.20.

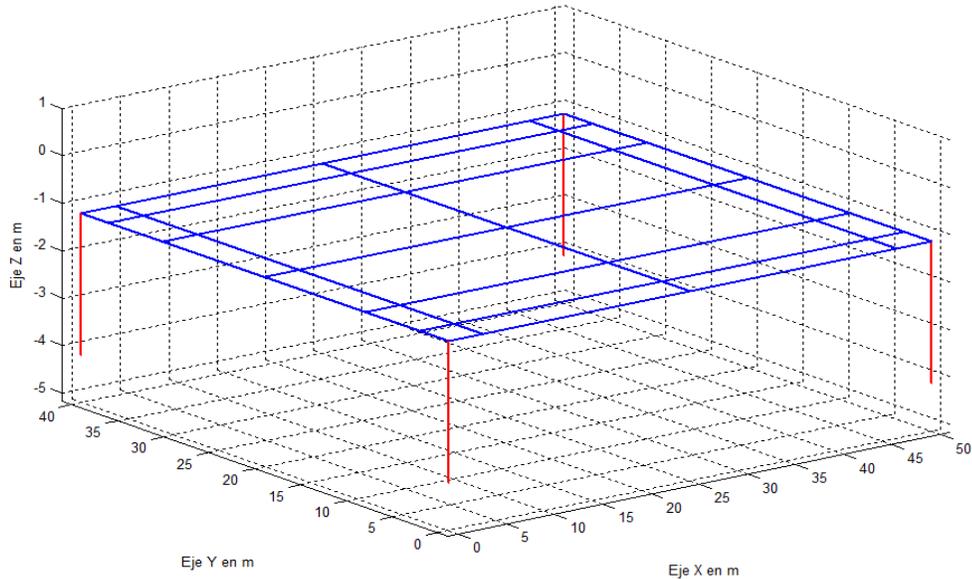
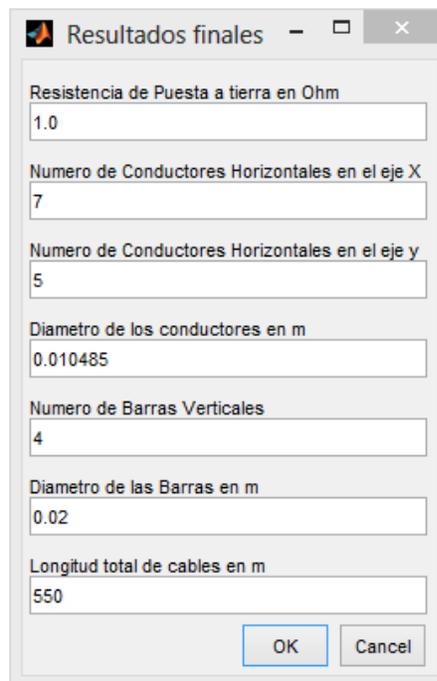


Figura 3.17. Malla de 50 x 40 m optimizada por el NSGA II.



Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	1.0
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	7
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	5
Diametro de los conductores en m	0.010485
Numero de Barras Verticales	4
Diametro de las Barras en m	0.02
Longitud total de cables en m	550

Figura 3.18. Resultados de la malla optimizada por el NSGA II de 50 x 40 m.

La tensión de contacto máxima es 633.6672 V en el punto (0,0) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (633.7472 V) para una tensión de la malla de 3061.6195 V

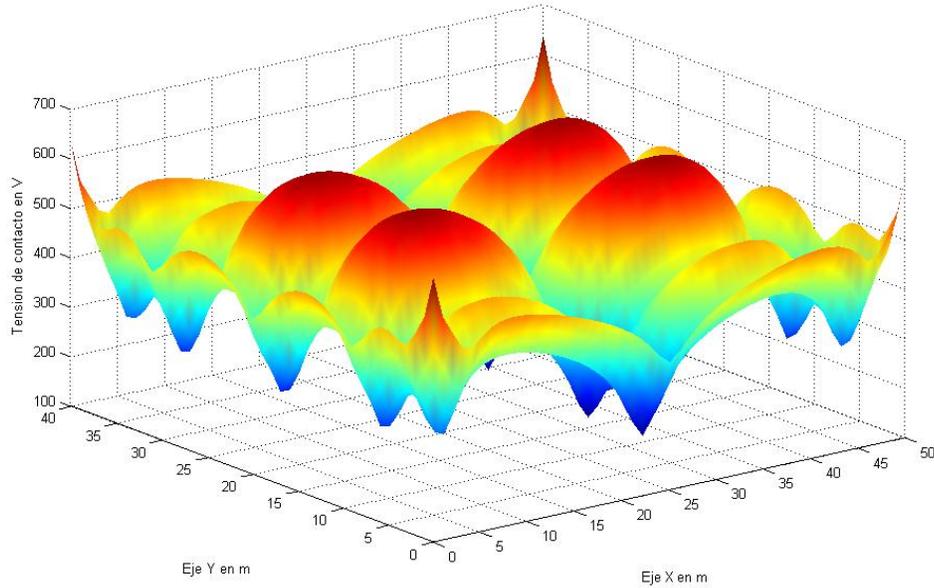


Figura 3.19. Potenciales de contacto de la malla optimizada de 50 x 40 m.

La imagen muestra una ventana de software titulada "Resultados económicos" que presenta un balance de costos para la instalación de la malla. Los datos son los siguientes:

Descripción	Costo (\$)
Costo de los electrodos verticales	84
Costo de los conductores horizontales	1215.5
Costo de las uniones	70
Costo por desplazamiento de tierra	687.5
Costo de hincar electrodos verticales	20
El costo total de la instalación es aproximadamente de	2077

En la parte inferior de la ventana se encuentran los botones "OK" y "Cancel".

Figura 3.20. Balance económico de la malla optimizada de 50 x 40 m.

3.5. Optimización de la malla de 220 x 180 m por el método de la NSGA II

Al someter la malla de 220 x 180 a un proceso de optimización por el método de la NSGA II, se obtiene la malla que se muestra en la figura 3.21, cuyo valor de resistencia y otros datos se muestra en la figura 3.22. En la figura 3.23 se muestran sus potenciales de

contacto, que como se puede apreciar presentan una mayor uniformidad en todos los módulos, un balance económico de esta malla se muestra en la figura 3.24.

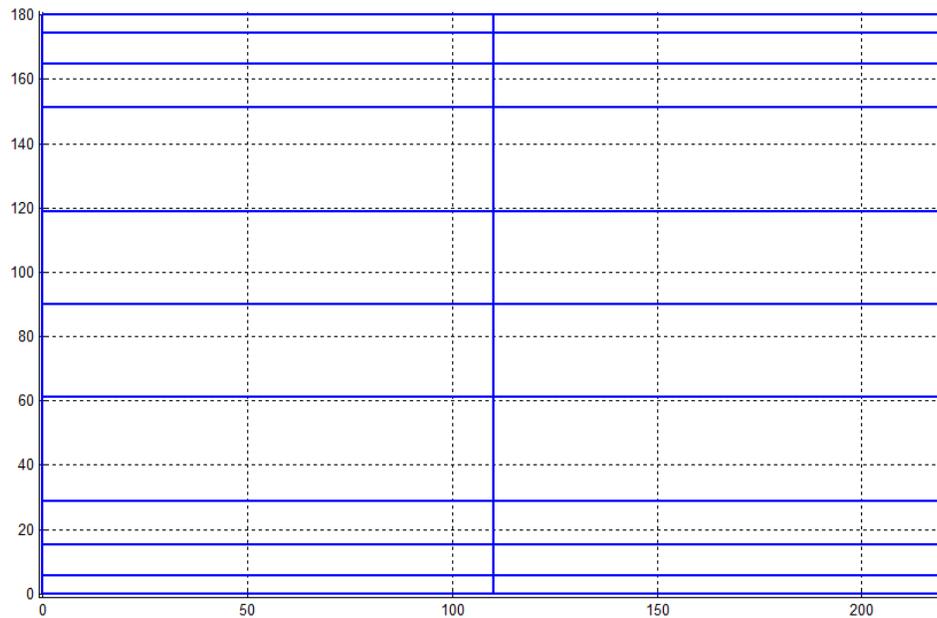


Figura 3.21. Malla de 220 x 180 m optimizada por la NSGA II.

Parámetro	Valor
Resistencia de Puesta a tierra en Ohm	0.24532
Numero de Conductores Horizontales en el eje X	11
Numero de Conductores Horizontales en el eje y	3
Diametro de los conductores en m	0.0106
Numero de Barras Verticales	0
Diametro de las Barras en m	0.016
Longitud total de cables en m	2960

Figura 3.22. Resultados de la malla optimizada por la NSGA II de 220 x 180 m.

La tensión de contacto máxima es 497.2953 V en el punto (0,0) siendo menor que la permisible por el cuerpo humano (504.1521 V) para una tensión de la malla de 1962

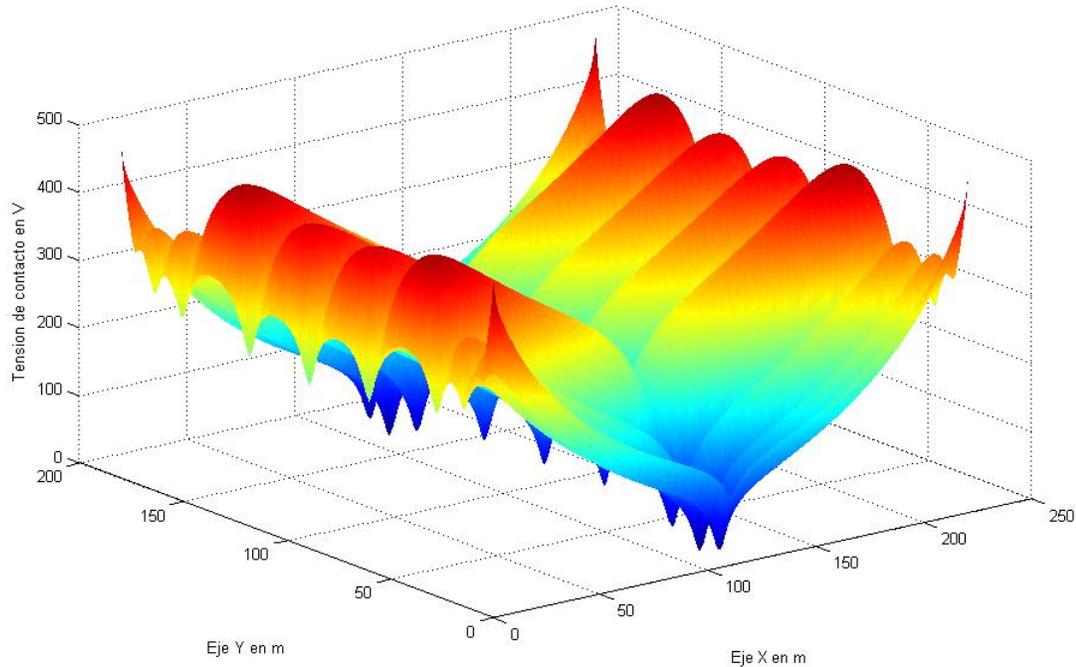


Figura 3.23. Potenciales de contacto de la malla optimizada de 220 x 180 m.

A screenshot of a software dialog box titled 'Resultados económicos'. It contains several input fields with numerical values and a total cost calculation. The fields are:

Item	Value
Costo de los electrodos verticales (\$)	0
Costo de los conductores horizontales (\$)	6541.6
Costo de las uniones (\$)	66
Costo por desplazamiento de tierra (\$)	3700
Costo de hincar electrodos verticales	0
El costo total de la instalación es aproximadamente de (\$)	10307.6

At the bottom right, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 3.24. Balance económico de la malla optimizada de 220 x 180 m.

Haciendo una comparación general con la ayuda de la Tabla 3.1, se puede apreciar que el método de la NSGA II ofrece un nivel de optimización mayor que el método

implementado en el PAST, aunque los tiempos de computo necesario son mucho mayores que los empleados por el PAST, aspecto en el que se debe continuar trabajando.

Tabla 3.1. Resumen comparativo de los dos métodos de optimización.

Método	Total de conductores en m	No de Conductores por la X	No de Conductores por la Y	Profundidad en m	Diámetro de los conductores en m	Costo Total en CUC
50x40 Uniforme	970	9	13	1	0.0132	6644
220x180 Uniforme	3360	3	15	1	0.0132	21930
PAST 50x40	540	6	6	1	0.0264	3686
PAST 220x180	3000	3	13	1	0.0165	16339
NSGA II 50x40	550	7	5	0.5	0.0105	2077
NSGA II 220x180	2960	11	3	0.5	0.0105	10307

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1 Los parámetros seleccionados como indicadores de costo permiten una evaluación aceptada del nivel de optimización de las mallas de tierra.
- 2 La metodología de optimización implementada actualmente en el PAST resulta satisfactoria, pero es superada por la lograda con el algoritmo de la NSGA II.
- 3 La técnica de optimización multiobjetivo aun cuando necesita un tiempo de computo mucho mayor que el implementado en el PAST, el nivel de optimización logrado y la reducción en costo lo hacen más efectivo.

Recomendaciones

Continuar perfeccionando la función objetivo implementada en el algoritmo de la NSGA II para lograr un mayor nivel de optimización y reducir el tiempo de computo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. A. Gallego, A. Escobar, R. A. Romero, "Técnicas de Optimización Combinatorial". Primera Edición, Abril de 2006.
- [2] Eckart Zitzler and Lothar Thiele, "Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 4, november 1999.
- [3] K. Deb and S. Agrawal and A. Pratap and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", Technical report, Indian Institute of Technology, Kanpur: Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGAL), Vol 15, 2000.
- [4] K. Deb, "Multi-objective Genetic Algorithms: Problem Difficulties and Construction of Test Problems", Evolutionary Computation, 1999, 7(3).
- [5] K. Deb and S. Agrawal and A. Pratap and T. Meyarivan, "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA-II", Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI, 2000.
- [6] Schrage, L. (1997) Optimization Modeling with LINDO. Duxbury Press. Williams, H.P. (1999) Model Building in Mathematical Programming. 4th Edition. John Wiley and Sons.
- [7] Engineering, January, 1945.(Reprducido en Norma ANSI/IEEE Std 80-1986)
- [8] Engineering, 30 January, 2000 (Norma ANSI/IEEE Std.80/2000) Power Engineering Society.
- [9] A.I. Yakobs, S.I Kostruba, V.T. Zhivago, Calculo de Instalaciones de Puesta a Tierra Complejas Mediante Computadora Electricas, Elektrichestvo, No 8. 1967 (Traduccion Ruso-Español).
- [10] J. G. Sverak, "Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Technique", IEEE Trans., Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976.
- [11] P. Ortuondo, "Manual para el Proyecto y Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra", Imprenta América Ltda. Chile, 1997, pp.5-61 – 5-65.

- [12] Valcárcel, Ángel C. "Sistemas de puesta a tierra y protección de equipos electrónicos sensibles". Monografía, Centro de Estudios Electroenergéticos, UCLV, Santa Clara, 2007.
- [13] IEEE 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [14] Almirall. J. L., "Temas de Ingeniería Eléctrica", Tomo II. Editorial Pueblo y Educación. Habana, Cuba.
- [15] IEEE 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [16] S. Stefanescu, C. et M. Schlumberger, Journal Physique et le Radium, vol. 11.1930
- [17] Garrett, D.L., Holley, H.J., Calculation of Substation Grounding System Resístanse Ucing Matriz Techniques, IEEE Trans., Vol. PAS-99, No. 5 Sept/Oct 1980.