Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

“Optimización en el diseño de transformadores de distribución”

Autores

Nombre y Apellido: Segundo Flamini Marczuk
DNI: 44265294 *Nro. Legajo Alumno:* 16171
Mail de contacto: segundoflamini@gmail.com
Carrera: Ingeniería Electromecánica

Nombre y Apellido: Octavio Sainz
DNI: 41783507 *Nro. Legajo Alumno:* 13905
Mail de contacto: octasainz@gmail.com
Carrera: Ingeniería Electromecánica

Director/es del Proyecto

Director: Dr. Ing. Justo José Roberts

Codirector: Ing. Joaquín Sánchez

Mar del Plata, **22 de agosto de 2025**

RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.
Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.
A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

“Optimización en el diseño de transformadores de distribución”

Autores

Nombre y Apellido: Segundo Flamini Marczuk
DNI: 44265294 *Nro. Legajo Alumno:* 16171
Mail de contacto: segundoflamini@gmail.com
Carrera: Ingeniería Electromecánica

Nombre y Apellido: Octavio Sainz
DNI: 41783507 *Nro. Legajo Alumno:* 13905
Mail de contacto: octasainz@gmail.com
Carrera: Ingeniería Electromecánica

Director/es del Proyecto

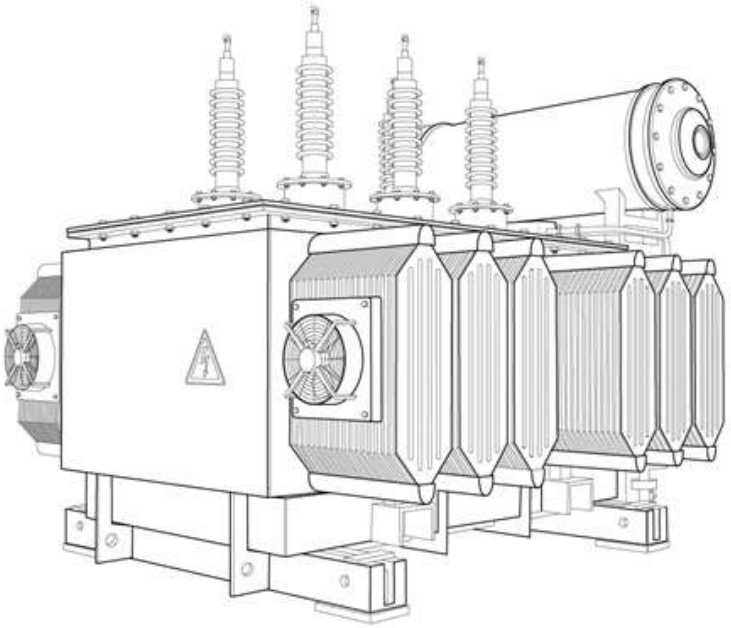
Director: Dr. Ing. Justo José Roberts

Codirector: Ing. Joaquín Sánchez

Mar del Plata, **22 de agosto de 2025**

PROYECTO FINAL DE GRADO INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN



Autores: **FLAMINI MARCZUK, SEGUNDO**
SAINZ, OCTAVIO

Director: **Dr. Ing. ROBERTS, JUSTO JOSÉ**
Codirector: **Ing. SÁNCHEZ, JOAQUÍN**

Evaluadores: **Mg. Ing. CARLOS AGÜERO**
Ing. NICOLÁS SANTINI

Ing. LEONARDO NICOLINI

7 de julio de 2025

Índice general

I - Resumen....x
II - Abstract....xi
1. Introducción....1
2. Antecedentes, estado del arte....3
2.1. Transformadores, su definición y función....3
2.2. Evolución del transformador....5
2.3. Componentes principales de un transformador....6
2.3.1. Núcleo magnético....7
2.3.2. Devanados....9
2.3.2.1. Devanados de baja tensión....9
2.3.2.2. Devanados de alta tensión....10
2.3.2.3. Posición de los devanados....11
2.3.3. Aislamiento....11
2.3.3.1. Conexión de los devanados....13
2.3.4. Sistemas de refrigeración del transformador....15
2.3.5. Cuba....16
2.4. Proceso de cálculo y diseño convencional de transformadores....19
2.5. Optimización en la ingeniería de diseño....21
2.5.1. Expresión de un problema de optimización....21
3. Técnicas de optimización y su aplicación al diseño de transformadores de distribución....25
3.1. Técnicas de optimización convencionales....25
3.1.1. Técnicas clásicas con enfoque derivativo....25
3.1.1.1. Método de Newton-Raphson....26
3.1.1.2. Método de bisección....27
3.1.2. Programación lineal (Linear Programming)....28
3.1.3. Programación no-lineal (Non-linear programming)....28
3.1.4. Programación geométrica....29
3.1.5. Optimización combinatoria....29
3.1.6. Aplicabilidad de las técnicas de optimización convencionales al diseño de transformadores....29
3.2. Técnicas de optimización metaheurísticas....30
3.2.1. Algoritmo genético (GA)....31
3.2.1.1. Relación con la biología....31
3.2.1.2. Etapas del algoritmo genético....31
3.2.2. Algoritmo NSGA-II....32
3.2.2.1. Concepto de solución no-dominada....33

3.2.2.2. Frente de Pareto....33
3.2.3. Algoritmo de recocido simulado (SA)....34
3.2.3.1. El proceso físico de recocido y su analogía con la optimización....35
3.2.3.2. Etapas del algoritmo de recocido simulado....35
3.2.3.3. Parámetros del algoritmo SA....37
3.2.4. Enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization - PSO)....38
3.2.4.1. Etapas del PSO....38
3.2.5. Búsqueda Tabú (Tabu Search - TS)....39
3.2.5.1. Etapas de la Búsqueda Tabú....40
3.3. Estado del arte en materia de optimización de transformadores....41
3.4. Técnicas de optimización utilizadas en el presente trabajo....42
4. Proceso de diseño y formulación del problema de optimización....45
4.1. Proceso de diseño de un transformador....45
4.2. Parámetros ingresados por el diseñador....47
4.3. Variables de diseño....47
4.4. Restricciones....50
4.4.1. Densidad de corriente....51
4.4.2. Relación entre el número de vueltas en BT y el diámetro de columna del núcleo....51
4.4.3. Carga lineal....52
4.4.4. Tamaños de la cuba....53
4.4.5. Potencia de pérdidas....54
4.4.6. Límites a las variables....55
4.4.6.1. Diámetro de columna....56
4.4.6.2. Coeficiente de utilización del núcleo....57
4.4.6.3. Inducción máxima....58
4.4.6.4. Secciones de pletinas y conductores para ambos arrollamientos....59
4.4.7. Resumen de restricciones y límites....60
4.5. Técnicas metaheurísticas aplicadas....63
4.5.1. Algoritmo genético (GA)....63
4.5.1.1. Descripción del GA adoptado....63
4.5.2. Algoritmo NSGA-II....69
4.5.2.1. Descripción del NSGA-II adoptado....69
Fast Nondominated Sorting (FNS)....69
Crowding Distance Assignment (CDA)....69
Tournament Selection....69
4.5.3. Algoritmo de recocido simulado (SA)....70
4.5.3.1. Descripción del SA adoptado....70
4.5.4. Fuerza bruta....73
4.5.4.1. Aplicación a un subproblema del diseño de transformadores....73
4.5.4.2. Diferencia con los otros métodos de optimización aplicados....76

4.5.5. Definición de precios y valores....76
4.5.6. Parámetros de entrada del caso de estudio....77
5. Análisis de resultados....78
5.1. Algoritmo genético (GA)....78
5.2. Recocido simulado (SA)....90
5.3. NSGA-II....98
5.4. Comparación de los métodos de optimización....100
5.5. Variaciones en los coeficientes de ponderación....103
5.6. Aluminio vs. Cobre....112
5.6.1. Ventajas y desventajas del uso de aluminio y cobre en transformadores de distribución....112
5.6.2. Comparación de transformadores de 630 [kVA] de aluminio y cobre....115
5.6.3. Comparación de la estructura de costos de los materiales....118
5.6.4. Comparación de los resultados con transformadores comerciales....120
5.7. Comparación de los resultados con los métodos de cálculo tradicionales....122
6. Breve estudio del impacto ambiental en Mar del Plata....124
6.1. Contexto regulatorio y conceptos ambientales....124
6.2. Cuantificación de impacto ambiental....125
7. Conclusiones....128
Bibliografía....130
Anexos....132
Anexo 1: Variables definidas en script y función de evaluación....132
Anexo 2: Código Algoritmo Genético (GA)....139
Anexo 3: Código Simulated Annealing (SA)....151
Anexo 4: Código Algoritmo Genético multiobjetivo (NSGA-II)....154
Anexo 5: Validación del funcionamiento de los algoritmos empleados: problema sencillo..157
Anexo 6: Catálogos de transformadores comerciales comparados....159
Anexo 7: Datos de la PC en la que se realizaron las simulaciones....162

Índice de tablas

Figura 2.1 – Transformador construido por William Stanley en 1885. Fuente [1]..... 5
Tabla 2.1 - Tipos de conexión en transformadores. Fuente: Elaboración propia..... 14
Tabla 2.2 - Tipos de ventilación. Fuente: IRAM CEA F 20-99..... 15
Tabla 3.1 - Características de las técnicas de optimización convencionales. Fuente: Elaboración propia..... 30
Tabla 3.2 - Ejemplo de soluciones dominadas y no-dominadas. Fuente: Elaboración propia.. 33
Tabla 3.3 - Parámetros del Simulated Annealing. Fuente: Elaboración propia..... 37
Tabla 4.1 - Variables de diseño adoptadas para la optimización del diseño de transformadores de distribución. Fuente: Elaboración propia..... 50
Tabla 4.2 - Dimensiones máximas para transformadores de distribución según IRAM 2250:2013..... 54
Tabla 4.3 - Dimensiones máximas para transformadores de distribución según IRAM 2250:2013..... 55
Tabla 4.4 - Restricciones aplicadas. Fuente: Elaboración propia..... 61
Tabla 4.5 - Límites impuestos en la generación inicial de variables de diseño. Fuente: Elaboración propia..... 62
Tabla 4.6 - Intereses de los participantes en el proceso de compra de un transformador. Fuente: Elaboración propia..... 64
Tabla 4.7 - Tipo de generación inicial aplicado a cada variable de diseño. Fuente: Elaboración propia..... 65
Tabla 4.8 - Características de la mutación de cada una de las variables de diseño. Fuente: Elaboración propia..... 66
Tabla 4.9 - Valores adoptados para los parámetros del algoritmo SA. Fuente: Elaboración propia..... 71
Tabla 4.10 - Expresiones de las alturas de cada escalón en el conformado del núcleo. Fuente: Elaboración propia..... 75
Tabla 4.11 - Variables de entrada y salida a la función que calcula el área efectiva de cada columna del transformador. Fuente: Elaboración propia..... 75
Tabla 4.12 Valor monetario asignado a cada material y el valor de las pérdidas eléctricas. Se provee la fuente consultada para definir dichos valores..... 76
Tabla 4.13 Parámetros de entrada para los transformadores a diseñar. Fuente: Elaboración propia..... 77
Tabla 5.1 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 1. Fuente: Elaboración propia..... 80
Tabla 5.2 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 2. Fuente: Elaboración propia..... 82
Tabla 5.3 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 3. Fuente: Elaboración propia..... 84
Tabla 5.4 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 4. Fuente: Elaboración propia..... 86
Tabla 5.5 - Comparación del comportamiento del GA en cada uno de los 4 casos. Fuente: Elaboración propia..... 88
Tabla 5.6 - Datos del mejor transformador obtenido a través del GA. Fuente:

Elaboración propia..... 89
Tabla 5.7 - Resultados de la simulación del SA con los parámetros del caso 1. Fuente: Elaboración propia..... 91
Tabla 5.8 - Resultados de la simulación del SA con los parámetros del caso 2. Fuente: Elaboración propia..... 93
Tabla 5.9 - Resultados de la simulación del SA con los parámetros del caso 3. Fuente: Elaboración propia..... 95
Tabla 5.10 - Comparación del comportamiento del SA en cada uno de los 3 casos. Fuente: Elaboración propia..... 97
Tabla 5.11 - Soluciones no-dominadas halladas por NSGA-II..... 99
Tabla 5.12 - Soluciones halladas por GA y SA. Fuente: Elaboración propia..... 100
Tabla 5.13 - Comparación de las tres técnicas metaheurísticas empleadas. Fuente: Elaboración propia..... 102
Tabla 5.14 - Resultados para =1 y =100. Fuente: Elaboración propia..... 105
Tabla 5.15 - Resultados para =1 y =15. Fuente: Elaboración propia..... 107
Tabla 5.16 - Resultados para =1 y =5. Fuente: Elaboración propia..... 109
Tabla 5.17 - Efecto de los coeficientes de ponderación y sobre la interpretación de los resultados. Fuente: Elaboración propia..... 110
Tabla 5.18 - Características de los transformadores según el grupo participante “beneficiado”. Fuente: Elaboración propia..... 112
Tabla 5.19 - Calor específico del cobre y del aluminio. Fuente: Elaboración propia..... 113
Tabla 5.20 - Comparación de los transformadores de 630[kVA] de cobre y aluminio obtenidos. Fuente: Elaboración propia..... 116
Tabla 5.21 Comparación de volúmenes, costos y pérdidas de los transformadores obtenidos. Fuente: Elaboración propia..... 118
Tabla 5.22 - Estructuras de costos de los transformadores obtenidos. Fuente: Elaboración propia..... 119
Tabla 5.23 - Comparación de transformadores de cobre. Fuente: [14]..... 121
Tabla 5.24 - Comparación de transformadores de aluminio. Fuente: [15]..... 122
Tabla 6.1 - Características del transformador de 630[kVA] diseñado en “Cálculo y construcción de transformadores” de Dimenna y Stecca..... 128
Tabla 6.2 - Comparación del transformador diseñado en forma manual con el diseñado a través de las herramientas de optimización creadas. Fuente: Elaboración propia..... 129

Índice de figuras

Figura 2.3 – Núcleos magnéticos de tipo columna, monofásico y trifásico. Fuente [2]..... 8
Figura 2.4 – Núcleos magnéticos de tipo coraza. De izquierda a derecha: monofásico, trifásico, trifásico de tipo monoposte. Fuente [2].....8
Figura 2.5 – Esquema de devanados concéntricos. Fuente [4].....9
Figura 2.6 – Bobinado tipo bobina o galletas (izquierda) y bobinado continuo o de capas (derecha). Fuente [4].....10
Figura 2.7 – Transformador con cuba lisa. Fuente [4]..... 17
Figura 2.8 – Transformador con cuba aleteada. Fuente [4].....18
Figura 2.9 – Transformador con cuba con tubos. Fuente [3]..... 19
Figura 2.10 – Diagrama de flujo del proceso de cálculo y diseño convencional de transformadores. Fuente: Elaboración propia.....20
Figura 3.1 – Alguna de las técnicas de optimización existentes.. Fuente: Elaboración propia.. 25
Figura 3.2 – Representación gráfica del método de Newton-Raphson. Fuente [5]..... 27
Figura 3.3 – Representación gráfica del método de bisección. Fuente [5].....28
Figura 4.1 – Dimensiones y características de una pletina cuyo vector asociado es (3, 25, 3, 1). Fuente: Elaboración propia.....48
Figura 4.2 – Dimensiones y características de un conductor redondo cuyo vector asociado es (4, 2.7, 5.7256, 1). Fuente: Elaboración propia.....49
Figura 4.3 – Gráfica que muestra la carga admisible en función de la relación b/h. Donde b es el apilado radial y h la altura axial del bobinado. Fuente [4]..... 53
Figura 4.4 – Coeficiente de utilización en función de la potencia nominal del transformador. Fuente [4].....58
Figura 4.5 – Inducción máxima en función de la potencia nominal del transformador. Fuente [4]..... 59
Figura 4.6 –Efecto de la inducción máxima sobre las pérdidas del transformador. Fuente: Elaboración propia.....59
Figura 4.7 – Esquema de cruce uniforme y cruce tradicional en un algoritmo genético. Fuente: Elaboración propia.....67
Figura 4.10 Diagrama de flujo del NSGA-II. Fuente: Elaboración propia..... 72
Figura 4.11 – Vista esquemática de la sección de la columna del núcleo. Fuente: Elaboración propia.....73
Figura 4.12 – Esquema geométrico del núcleo escalonado y variables de diseño involucradas. Fuente: Elaboración propia.....74
Figura 5.1 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 1. Fuente: Elaboración propia.....79
Figura 5.2 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 2. Fuente: Elaboración propia.....81
Figura 5.3 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 3. Fuente: Elaboración propia.....83
Figura 5.4 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 4. Fuente: Elaboración propia.....85
Figura 5.5 – Comparativa de resultados GA-1 para distinta cantidad de generaciones y tipo

de mutación. Fuente: Elaboración propia..... 87
Figura 5.6 – Valor de la función objetivo vs. iteraciones (tasa de enfriamiento de 0,99). Fuente: Elaboración propia..... 90
Figura 5.7 – Valor de la función objetivo vs. iteraciones (tasa de enfriamiento de 0,995). Fuente: Elaboración propia..... 92
Figura 5.8 – Valor de la función objetivo vs iteraciones (tasa de enfriamiento de 0,95). Fuente: Elaboración propia..... 94
Figura 5.9 – Evolución de las tres simulaciones de recocido simulado (SA). Fuente: Elaboración propia..... 96
Figura 5.10 – Resultados NSGA-II. Fuente: Elaboración propia..... 98
Figura 5.11 – Evolución del frente de Pareto a lo largo de las generaciones. Fuente: Elaboración propia..... 99
Figura 5.13 – Evolución de la función objetivo con coeficientes de ponderación α = 1 y β = 100. población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Fuente: Elaboración propia.. 104
Figura 5.14 – Evolución de la función objetivo con coeficientes de ponderación α = 1 y β = 15. población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Fuente: Elaboración propia.... 106
Figura 5.15 – Evolución de la función objetivo con coeficientes de ponderación α = 1 y β = 5. población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Fuente: Elaboración propia..... 108
Figura 5.16 – Resultados de los tres métodos de optimización empleados. Fuente: Elaboración propia.....110
Figura 5.17 – Resultados de los tres métodos de optimización empleados. Fuente: Elaboración propia.....111
Figura 5.18 – Comportamiento térmico del cobre y del aluminio frente a una sobrecarga. Fuente [4]..... 114
Figura 5.19 – Esquema de los transformadores obtenidos, con sus medidas acotadas. Fuente: Elaboración propia..... 117
Figura 5.20 – Comparación del costo en materiales entre un transformador con conductores de cobre y uno con conductores de aluminio. Fuente: Elaboración propia.....119
Figura 5.21 – Evolución del precio del cobre y el aluminio entre 2011 y 2023. Fuente [11] 120
Figura 5.22 – Comparación de las tres dimensiones de los transformadores analizados. Fuente: Elaboración propia..... 123
Figura 5.23 – Comparación del volumen de los transformadores analizados. Fuente: Elaboración propia..... 124

Abreviaturas y Símbolos

Abreviaturas

GA	Algoritmo genético de objetivo simple
SA	Simulated Annealing (Algoritmo de recocido simulado)
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (multiobjetivo)
PSO	Particle Swarm Optimization
TS	Tabu Search
MT	Media tensión
BT	Baja tensión

Símbolos

V_L Tensión de línea.

V_f Tensión de fase.

I_L Corriente de línea.

I_f Corriente de fase.

$\theta_{ac\,m}$ Calentamiento medio del aceite.

$\theta_{ac\,max}$ Calentamiento máximo del aceite.

sup_{cuba} Superficie lateral necesaria en la cuba.

X Vector de diseño.

$F(X)$ Función objetivo

$g_j(X)$ Restricciones de desigualdad.

$I_j(X)$ Restricciones de igualdad.

G_o Configuración inicial SA.

T_o Temperatura inicial SA.

$T_{máx}$ Temperatura máxima SA.

$T_{mín}$ Temperatura mínima SA.

G_n Configuración n SA.

γ Factor de enfriamiento SA.

$v(G_n)$ Valor función objetivo SA para la configuración G_n.

P Probabilidad de aceptación de configuración SA.

N_{it} Número de iteraciones SA.

E Fuerza electromotriz/tensión simple.

f Frecuencia.

$D_{columna}$ Diámetro de las columnas del núcleo.

P_{Fe} Pérdidas en el hierro.

P_{Cond} Pérdidas de conducción.

P_0 Pérdidas en vacío

P_k Pérdidas de cortocircuito.

N Número de espiras por fase.

$B_{Máx}$ Inducción máxima en el núcleo en T.

k_0 Factor de apilado del núcleo.

q Carga lineal.

C Coeficiente de utilización del núcleo

α Coeficiente de ponderación del costo de las pérdidas.

β Coeficiente de ponderación del costo de los materiales.

h_n Altura del escalón n del núcleo.

$ancho_n$ Ancho del escalón n del núcleo.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a nuestras familias y amigos por el apoyo, la paciencia y el acompañamiento incondicional a lo largo de este proceso.

A nuestros directores, *Dr. Ing. Justo José Roberts* e *Ing. Joaquín Sánchez* por su guía, dedicación y valiosos aportes en cada etapa del trabajo.

Finalmente, queremos expresar nuestro sincero agradecimiento al personal de COPETRAF Ltda. encabezado por *Javier Nogueira Pinto* por la información brindada y los *insights* que resultaron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

I - Resumen

Los transformadores de distribución son componentes esenciales en los sistemas eléctricos, ya que permiten adaptar los niveles de tensión para su utilización en entornos urbanos, industriales y rurales. Si bien su diseño está ampliamente difundido y normalizado, la necesidad de reducir las pérdidas energéticas y los costos asociados a los materiales utilizados impulsa la búsqueda de soluciones más eficientes.

El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el diseño de transformadores de distribución trifásicos mediante la aplicación de técnicas metaheurísticas. A partir de un modelo de transformador típico, se formuló el problema a través de una función objetivo compuesta por dos términos principales: las pérdidas eléctricas y el costo de los materiales. Se definieron las variables de diseño, las restricciones técnicas y los rangos admisibles conforme a las normativas vigentes.

Se implementaron y analizaron tres algoritmos de optimización: algoritmo genético (GA), algoritmo de recocido simulado (SA) y el algoritmo multiobjetivo NSGA-II. Estos métodos fueron programados íntegramente por los autores, en el lenguaje de programación Python. Se evitó utilizar librerías existentes, ya programadas, lo que permitió un control detallado sobre cada etapa del proceso y facilitó la adaptación del código a las particularidades del modelo de transformador considerado. Además, se realizaron estudios de sensibilidad sobre los coeficientes de ponderación de la función objetivo, permitiendo analizar cómo incide la prioridad dada al costo o a las pérdidas en los resultados finales.

Los resultados obtenidos muestran que las técnicas metaheurísticas utilizadas permiten alcanzar diseños que mejoran significativamente el comportamiento técnico-económico del transformador, con reducciones importantes tanto en pérdidas como en costos, dependiendo del criterio de optimización adoptado. El estudio concluye con una comparación entre los métodos y analiza el impacto ambiental de la implementación de los resultados.

II - Abstract

Distribution transformers are essential components in electric power systems, as they enable voltage level adaptation for use in urban, industrial, and rural environments. Although their design is widely standardized and established, the need to reduce energy losses and the costs associated with the materials used drives the search for more efficient solutions

This work aims to optimize the design of three-phase distribution transformers through the application of metaheuristic techniques. Based on a typical transformer model, the problem was formulated as an objective function composed of two main terms: electrical losses and material cost. The design variables, technical constraints, and admissible ranges were defined in accordance with current standards.

Three optimization algorithms were implemented and analyzed: Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), and the NSGA-II algorithm. These methods were fully developed in Python, allowing detailed control over each stage of the process and facilitating adaptation of the code to the particularities of the transformer model. Additionally, sensitivity studies were conducted on the weighting coefficients of the objective function, enabling analysis of how prioritizing cost or losses affects the final results.

The results show that the metaheuristic techniques used lead to designs with significant improvements in the technical and economic performance of the transformer, with notable reductions in both losses and costs, depending on the chosen optimization criteria. The study concludes with a comparison of the methods and proposes future work aimed at industrial implementation and the incorporation of environmental criteria into the design process.

1. Introducción

La demanda creciente de energía eléctrica y los requerimientos de eficiencia energética impuestos por los desafíos ambientales y económicos contemporáneos hacen imperioso el desarrollo de tecnologías que permitan optimizar los sistemas eléctricos en todas sus etapas: generación, transmisión y distribución. Dentro de este último eslabón, los transformadores de distribución ocupan un rol central al permitir adaptar los niveles de tensión a los requerimientos finales de los usuarios, con la menor cantidad de pérdidas posible.

Aunque los transformadores son dispositivos de diseño maduro y uso extendido desde fines del siglo XIX, el avance de las herramientas de modelado y cálculo, sumado a la evolución de materiales y técnicas de fabricación, abre hoy una ventana de oportunidad para optimizar sus diseños. No se trata solamente de aumentar su eficiencia energética, sino también de reducir su peso, tamaño y costos de fabricación, sin comprometer el cumplimiento de los estándares técnicos ni su confiabilidad en servicio.

El diseño de transformadores de distribución es un problema multidisciplinario que involucra variables eléctricas, electromagnéticas, térmicas, mecánicas y económicas, muchas de las cuales interactúan de manera no lineal. Por este motivo, en las últimas décadas se ha intensificado la aplicación de técnicas de optimización metaheurísticas, como los algoritmos genéticos o de recocido simulado, que permiten explorar espacios de solución complejos en busca de configuraciones óptimas. La integración de estos algoritmos con herramientas de simulación, ofrece una vía prometedora para enfrentar el desafío del diseño óptimo.

El presente trabajo busca aplicar herramientas de optimización computacional al diseño de transformadores de distribución trifásicos típicos, con el objetivo de minimizar sus pérdidas y costos materiales. Se adopta una perspectiva de ingeniería aplicada, buscando soluciones que no sólo sean teóricamente eficientes sino también factibles desde el punto de vista de la fabricación.

Este estudio surge en el marco de la formación brindada por la Facultad de Ingeniería de la UNMDP, particularmente a partir del cursado de la materia optativa “Transformadores: su Cálculo y Construcción”. Esta asignatura ofrece un abordaje integral del diseño de transformadores, desde su base física hasta sus aspectos constructivos.

En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes y el estado del arte, con una revisión de los transformadores, su evolución histórica, los componentes principales que conforman su diseño y las técnicas actuales utilizadas para su optimización. En el Capítulo 3 se abordan las distintas metodologías de optimización consideradas, tanto clásicas como metaheurísticas, detallando sus fundamentos y criterios de aplicación. En el Capítulo 4 se define el modelo de transformador utilizado como caso de estudio, se presentan las variables y restricciones del problema y se describen los métodos empleados. En el Capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos para cada técnica aplicada, comparando su rendimiento y factibilidad. En

el Capítulo 6 se analizan los beneficios ambientales de la implementación de las mejoras propuestas. Finalmente, en el Capítulo 7 se trazan conclusiones.

Así, los objetivos del presente trabajo son:

1) Revisar el procedimiento del diseño de transformadores de distribución.

2) Implementar técnicas de optimización usando el lenguaje de programación Python.

3) Realizar un análisis económico del costo de fabricación y su costo de operación traducido en pérdidas eléctricas.

4) Comparar los resultados obtenidos frente a estándares actuales del mercado.

5) Evaluar el impacto ambiental asociado a la reducción del consumo energético.

2. Antecedentes, estado del arte

2.1. Transformadores, su definición y función

El transformador es un equipo eléctrico estático, de inducción electromagnética, destinado a transferir energía eléctrica entre dos o más circuitos a través de un campo magnético. Durante la transferencia de energía, transforma un sistema de tensiones y corrientes alternas, a valores generalmente diferentes, y de igual frecuencia. Un transformador elevador incrementa la tensión de salida respecto a la de entrada, mientras que un transformador reductor disminuye dicho nivel de tensión para adaptarlo a los requerimientos del sistema [1].

Su funcionamiento se basa en el principio de la inducción electromagnética, descubierto por Michael Faraday en 1831. Consiste en la generación de una corriente inducida en un devanado secundario a partir de las variaciones del flujo magnético producido por una corriente alterna en el devanado primario. Para ello, el transformador cuenta con un núcleo ferromagnético que canaliza el flujo magnético y optimiza la transferencia de energía entre los devanados.

La principal función del transformador es modificar los niveles de tensión de la electricidad para adaptarla a diferentes necesidades de generación, transmisión y consumo. En sistemas de potencia, se utilizan transformadores elevadores para aumentar la tensión en la transmisión de energía, reduciendo las pérdidas por efecto Joule en las líneas. Posteriormente, transformadores reductores disminuyen la tensión a niveles adecuados para su distribución y uso en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales.

Los transformadores pueden clasificarse en monofásicos y trifásicos, dependiendo del número de fases del sistema eléctrico en el que operan. El diseño de los transformadores trifásicos suele realizarse con tres columnas o patas, sobre las cuales se arrollan los devanados primario y secundario. En estos dispositivos, el devanado de alta tensión se suele enrollar sobre el de baja tensión para optimizar el aislamiento y el rendimiento electromagnético. No existe una conexión eléctrica directa entre los devanados primario y secundario; en su lugar, la transferencia de energía ocurre a través del acoplamiento magnético en el núcleo.

Cuando se aplica un voltaje al devanado primario, este genera un flujo magnético en el núcleo ferromagnético del transformador. Dicho flujo induce un voltaje en el devanado secundario, permitiendo la transferencia de potencia de un circuito a otro sin contacto directo. Este principio de operación, basado en la inducción electromagnética, constituye la base para la conversión de niveles de tensión en los sistemas eléctricos.

Los transformadores pueden clasificarse de diferentes maneras. Si se refiere a la **potencia** que manejan dentro del sistema eléctrico, se pueden distinguir las siguientes categorías:

- **Transformadores de distribución**. Tienen capacidades que varían desde 5 hasta 500 kVA. Se utilizan para reducir la tensión en las redes de distribución y abastecer directamente a los usuarios finales, tanto en configuraciones monofásicas como trifásicas.
- **Transformadores de potencia**. Son aquellos cuya capacidad es mayor a 500 kVA. Se utilizan en subestaciones y sistemas de transmisión para elevar o reducir la tensión en redes eléctricas de mayor envergadura, permitiendo el transporte eficiente de grandes cantidades de energía.

En el presente trabajo nos abocamos al diseño de transformadores de distribución.

2.2. Evolución del transformador

La historia de los transformadores está estrechamente vinculada al desarrollo de los sistemas eléctricos. En los primeros días de la distribución de energía, a finales del siglo XIX, Thomas Edison implementó un sistema basado en corriente continua (CC) para alimentar bombillas incandescentes en Nueva York. Sin embargo, este sistema operaba a bajos voltajes, lo que generaba grandes pérdidas de energía en las líneas de transmisión y limitaba el alcance de las centrales generadoras. Esto incentivó la búsqueda de alternativas más eficientes.

Nikola Tesla y George Westinghouse introdujeron sistemas de corriente alterna (CA), que, gracias al uso de transformadores, permitieron cambiar los niveles de voltaje y transmitir electricidad a largas distancias. Este avance no solo resolvió las limitaciones de la CC, sino que estableció las bases para la electrificación moderna [1].

El concepto que sustenta el funcionamiento de los transformadores, la inducción electromagnética, fue descubierto por Michael Faraday en 1831. Más tarde, en 1885, William Stanley construyó el primer transformador práctico con núcleo laminado cerrado, considerado el antecedente directo del diseño actual.

Figura 2.1 – Transformador construido por William Stanley en 1885. Fuente [1]

Además de los avances eléctricos, el desarrollo de nuevos materiales ha sido crucial. La introducción de aislantes como cartón, papel kraft, prespan y papel baquelizado en transformadores sumergidos en aceite permitió reducir las distancias de seguridad y mejorar la eficiencia térmica, posibilitando diseños más compactos y fiables. El uso de aceites minerales como medio dieléctrico y refrigerante se consolidó como estándar, en reemplazo de los antiguos aceites con bifenilos policlorados (PCBs), debido a los riesgos ambientales y de inflamabilidad que estos representaban. [2]

En cuanto a los núcleos magnéticos, la transición del acero laminado en caliente al uso de chapas de acero al silicio con grano orientado laminadas en frío representó un avance significativo, al permitir reducir considerablemente las pérdidas específicas y aumentar la densidad de flujo magnético operativa. A comienzos del siglo XX, el acero dulce fue sustituido por aceros con pequeñas proporciones de aluminio para disminuir las pérdidas por histéresis.

Posteriormente, se introdujeron aceros con silicio, y hacia la década de 1930, se desarrollaron los primeros aceros con grano orientado. En los años 1970, Japón lideró la producción de aceros eléctricos de alta eficiencia, conocidos como Hi-B. Durante los años 1980, el espesor de las chapas se redujo significativamente, desde 0,35 mm hasta 0,05 mm, gracias a mejoras en el aislamiento entre láminas [3].

Estos avances también permitieron mejorar el factor de apilamiento del núcleo, aumentando el porcentaje de hierro útil respecto a la sección total y optimizando así el aprovechamiento del volumen y la eficiencia magnética del conjunto.

2.3. Componentes principales de un transformador

Un transformador cuenta con varias partes principales que son esenciales para su correcto funcionamiento y para garantizar la seguridad y eficiencia en la operación. La Figura 2.2 resalta 15 componentes fundamentales de un transformador de distribución inmerso en aceite. Cada uno de estos componentes cumple un rol fundamental dentro del equipo. En el presente apartado se describirán de forma general las principales partes que lo componen, detallando brevemente su función, evolución y características.

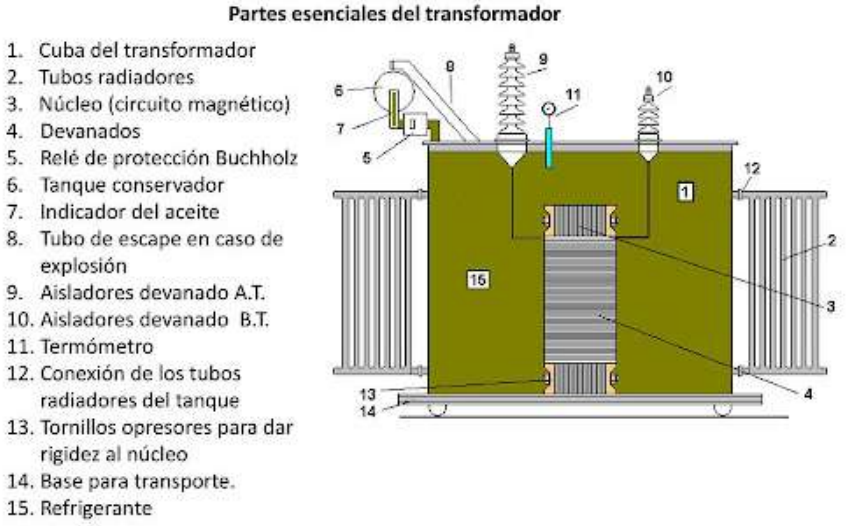


Figura 2.2 – Componentes de transformador de distribución. Fuente: *Ingeniería de Subestaciones*

2.3.1. Núcleo magnético

El núcleo magnético de los transformadores proporciona un camino de baja reluctancia para el cierre del circuito magnético, permitiendo el acoplamiento entre los devanados primario y secundario. Está compuesto por laminaciones de acero al silicio, con un contenido aproximado entre 2% y 3,5% de este elemento. Estas laminaciones poseen la propiedad de minimizar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Su diseño consiste en un conjunto de láminas dispuestas según la forma y dimensiones requeridas.

El uso de acero al silicio en los núcleos de las máquinas eléctricas se debe a que este material aumenta la resistividad del acero, lo que reduce la magnitud de las corrientes parásitas y, en consecuencia, disminuye las pérdidas energéticas asociadas. Además, mejora las propiedades magnéticas del material, permitiendo una mayor densidad de flujo magnético y reduciendo las pérdidas por histéresis. Esto se traduce en un funcionamiento más eficiente de los transformadores y otros equipos eléctricos que utilizan núcleos magnéticos.[1]

Por ser los transformadores máquinas estáticas, las chapas suelen ser de grano orientado para aprovechar la direccionalidad del flujo magnético y favorecer la alineación de dipolos magnéticos.

Otro material disponible para la confección de los núcleos de transformadores son los vidrios metálicos, también conocidos como metales amorfos, son materiales que presentan una estructura atómica desordenada, a diferencia de los metales cristalinos tradicionales. En el contexto de transformadores, los núcleos de vidrio metálico se fabrican a partir de aleaciones metálicas que se enfrían rápidamente para evitar la formación de una estructura cristalina. Esta estructura amorfa les confiere propiedades magnéticas superiores, como una menor pérdida por histéresis y por corrientes parásitas, en comparación con los aceros eléctricos convencionales.

Estos materiales tienen importantes propiedades magnéticas blandas y consisten esencialmente en varias combinaciones de metales ferromagnéticos, como el hierro, cobalto y níquel con metaloides como el boro y el silicio. Las aplicaciones para estas aleaciones incluyen transformadores de baja pérdida en el núcleo, sensores magnéticos y cabezas de grabación.

En aplicaciones de transformadores, los núcleos hechos de vidrio metálico pueden reducir significativamente las pérdidas en vacío (pérdidas sin carga), lo que es especialmente beneficioso en transformadores que operan continuamente sin estar cargados al máximo. Estas propiedades hacen que los vidrios metálicos sean una opción atractiva para mejorar la eficiencia energética de los transformadores, especialmente en entornos donde la reducción del consumo energético y las emisiones de carbono son una prioridad.

Este material no se tuvo en cuenta en el presente trabajo de optimización por los siguientes motivos:

- **Disponibilidad limitada:** En Argentina, no existe una oferta comercial extendida de núcleos con vidrios metálicos, lo que dificulta su implementación industrial.

- **Mayor costo:** El precio del material es considerablemente más alto que el de los núcleos tradicionales de acero al silicio. En el mejor de los casos, estos núcleos permiten disminuir en un 60% las pérdidas en vacío del transformador, que si bien es una gran mejora local, no representa una gran proporción del costo total ya que las pérdidas en conducción son mucho más significativas (las pérdidas en vacío son sólo alrededor de 15% de las totales). Esta mejora, se ve totalmente anulada por el incremento en precio del material. [3]

- **Falta de normalización:** Las propiedades técnicas del vidrio metálico no están estandarizadas con la misma precisión que los materiales convencionales, lo que complica su modelado e inclusión a los códigos.

Los transformadores de distribución utilizan principalmente dos configuraciones de núcleo:

Tipo columna

Este diseño se compone de dos o tres columnas (según si el transformador es monofásico o trifásico) y dos yugos, formando un circuito cerrado para el flujo magnético.

- **Columnas:** Son las partes verticales del núcleo donde se alojan los devanados primario y secundario.

- **Yugos:** Conectan las columnas en la parte superior e inferior, cerrando el circuito magnético.

En este tipo de núcleo, el flujo magnético circula principalmente a través de las columnas y se cierra por los yugos. Es la configuración más utilizada en transformadores de distribución de mediana y alta potencia debido a su construcción sencilla y eficiente. [2]

Para facilitar el ensamblaje y mantenimiento, en los núcleos de tipo columna, las laminaciones se organizan en capas alternadas ("pares" e "impares"), que luego se sujetan con tornillos opresores y tensores. La Figura 2.3 muestra esquemas de estos tipos de núcleos.

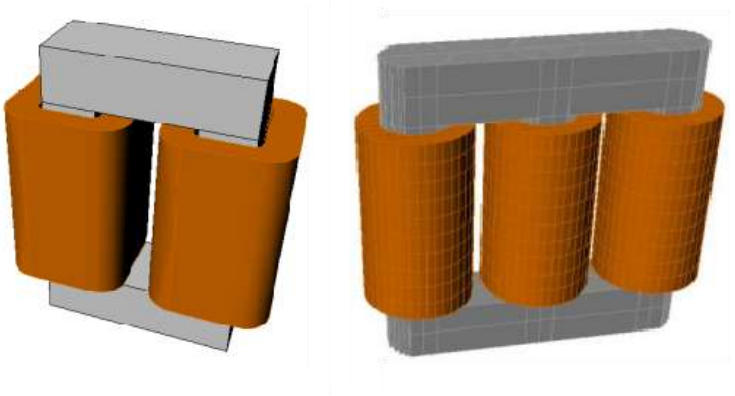


Figura 2.3 – Núcleos magnéticos de tipo columna, monofásico y trifásico. Fuente [2]

Tipo columna

Este diseño se compone de dos o tres columnas (según si el transformador es monofásico o trifásico) y dos yugos, formando un circuito cerrado para el flujo magnético.

- Columnas: Son las partes verticales del núcleo donde se alojan los devanados primario y secundario.
- Yugos: Conectan las columnas en la parte superior e inferior, cerrando el circuito magnético.

En este tipo de núcleo, el flujo magnético circula principalmente a través de las columnas y se cierra por los yugos. Es la configuración más utilizada en transformadores de distribución de mediana y alta potencia debido a su construcción sencilla y eficiente. [2]

Para facilitar el ensamblaje y mantenimiento, en los núcleos de tipo columna, las laminaciones se organizan en capas alternadas ("pares" e "impares"), que luego se sujetan con tornillos opresores y tensores. La Figura 2.3 muestra esquemas de estos tipos de núcleos.

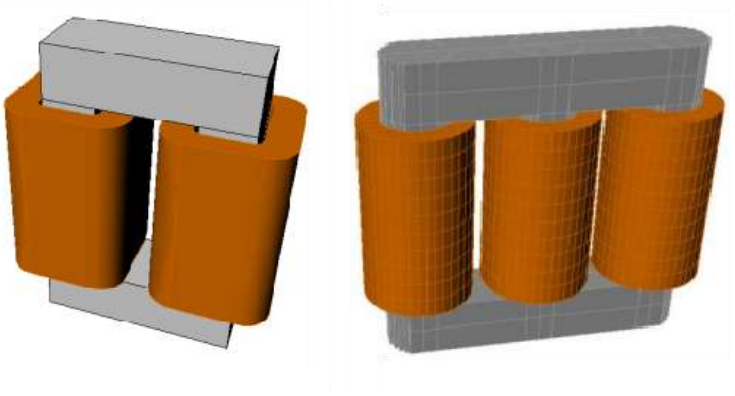


Figura 2.3 – Núcleos magnéticos de tipo columna, monofásico y trifásico. Fuente [2]

Tipo acorazado

A diferencia del tipo columna, en este diseño los devanados están rodeados por el núcleo magnético, lo que mejora la concentración del flujo y reduce la dispersión magnética. La Figura 2.4 esquematiza núcleos de tipo acorazado.

El núcleo está formado por una columna central, donde se ubican los devanados, y dos columnas laterales que permiten el cierre del circuito magnético. El flujo magnético se distribuye por ambas columnas laterales y se cierra a través de los yugos.

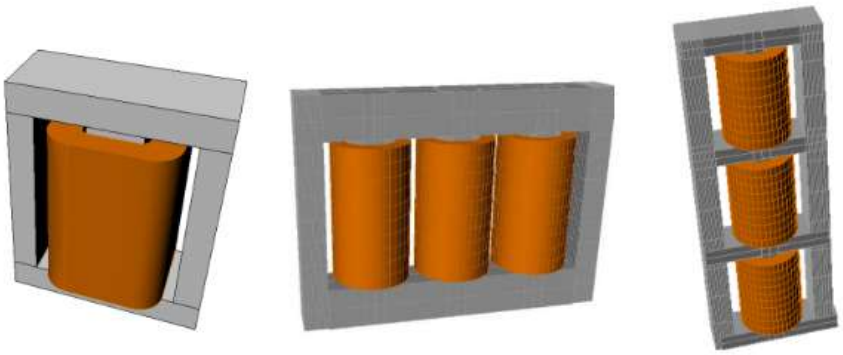


Figura 2.4 – Núcleos magnéticos de tipo coraza. De izquierda a derecha: monofásico, trifásico, trifásico de tipo monoposte. Fuente [2]

2.3.2. Devanados

Los devanados de un transformador pueden clasificarse en baja y alta tensión. Esta diferencia condiciona el proceso constructivo, ya que los criterios de diseño varían entre ambos tipos.

En los transformadores de distribución, los devanados primario y secundario suelen disponerse en configuración concéntrica: el devanado de baja tensión (BT) se arrolla directamente sobre el núcleo magnético, mientras que el devanado de alta tensión (AT) se enrolla sobre una capa aislante exterior a este, formando cilindros coaxiales alrededor del mismo eje. Ambos devanados se disponen en capas superpuestas en espiral, separadas por aislantes sólidos o canales de refrigeración, tal como muestra la Figura 2.5.

Por lo general, el devanado de baja tensión se coloca más cerca del núcleo del transformador. Para ello, se interpone un cilindro de papel aislante y, mediante separadores, se instala de manera concéntrica al devanado de mayor tensión.

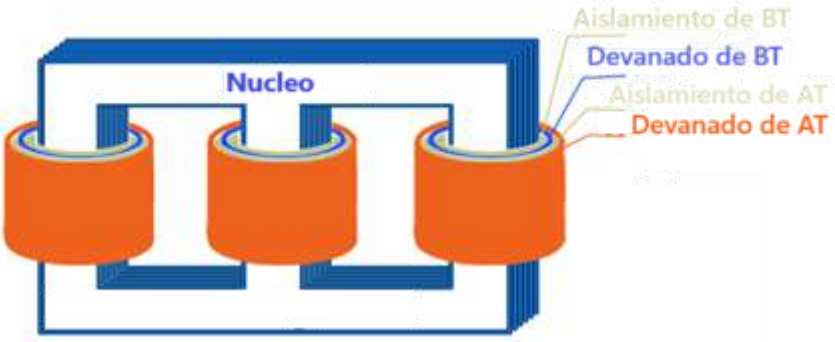


Figura 2.5 – Esquema de devanados concéntricos. Fuente [4]

Los extremos de los devanados, también conocidos como principio y final del devanado, se protegen con un aislante en forma de tubo, coloquialmente llamado "spaghetti", que proporciona una capa adicional de aislamiento y protección mecánica. [4]

2.3.2.1. Devanados de baja tensión

Los devanados de baja tensión suelen estar formados por una única capa de espiras, aunque en algunos casos pueden contar con dos o tres capas superpuestas. Se construyen utilizando conductores de sección rectangular o circular, los cuales están aislados para evitar descargas y pérdidas energéticas.

El uso de conductores redondos o circulares es común en transformadores de menor potencia, generalmente con diámetros que no superan los $3\ o\ 3,5\ mm$. En estos casos, el aislamiento puede estar compuesto de algodón, papel o un recubrimiento esmaltado. En los transformadores que emplean aceite como medio de enfriamiento, también se utilizan conductores con aislamiento de barniz poliéster.

Para transformadores de mediana y gran potencia, se recurre al uso de pletinas o soleras de cobre aisladas, en las cuales el aislamiento suele ser de papel o cinta de algodón. Cuando las corrientes que circulan por los devanados son elevadas, es común emplear múltiples pletinas en paralelo. Esto facilita la manipulación durante la construcción y contribuye a reducir las corrientes parásitas, mejorando así la eficiencia del transformador.

2.3.2.2. Devanados de alta tensión

Los devanados de alta tensión, en comparación con los de baja tensión, tienen un mayor número de espiras y conducen corrientes relativamente bajas. Debido a esto, suelen estar construidos con conductores de cobre de sección circular, con diámetros típicos de entre $2,5$ y $3,0$ mm.

Existen diferentes configuraciones según el fabricante, pero en general, los devanados pueden clasificarse en dos tipos principales. Uno de ellos es el denominado "tipo bobina", compuesto por varias capas de conductores dispuestas en forma discoidal o de galleta. Estas bobinas suelen conectarse en serie para alcanzar el número total de espiras requeridas en cada fase del transformador.

El otro tipo es el denominado "de capas" y continuo, que consiste en una única bobina con múltiples capas de conductor. A diferencia del tipo bobina, esta configuración se extiende longitudinalmente a lo largo del devanado, logrando una mayor densidad de espiras por capa en comparación con las bobinas discoidales.

La Figura 2.6 muestra a las dos configuraciones de devanados mencionadas.

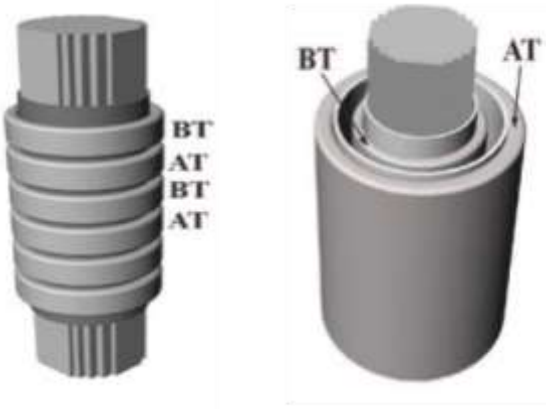


Figura 2.6 – Bobinado tipo bobina o galletas (izquierda) y bobinado continuo o de capas (derecha). Fuente [4]

Cada tipo de devanado se selecciona en función de las exigencias eléctricas y térmicas del transformador, buscando optimizar su rendimiento y confiabilidad en operación.

2.3.2.3. Posición de los devanados

La disposición de los devanados en un transformador debe equilibrar dos exigencias opuestas: el aislamiento eléctrico y la reducción de la dispersión del flujo magnético. Por un lado, un mayor aislamiento requiere una mayor separación entre los devanados; por otro, una menor dispersión del flujo demanda que el devanado primario esté lo más cerca posible del secundario. Para conciliar ambos requisitos, se emplean diferentes configuraciones de devanados, entre las cuales destacan las siguientes:

En la disposición concéntrica, cada devanado se distribuye a lo largo de toda la columna del núcleo, como se puede observar en la figura 2.5. El devanado de menor tensión se ubica en la parte interna, más cercana al núcleo, y está convenientemente aislado tanto del mismo como del devanado de mayor tensión mediante tubos aislantes, como cartón baquelizado o baquelita.

El diseño concéntrico doble divide el devanado de baja tensión en dos mitades, colocadas respectivamente en el interior y exterior del devanado de alta tensión. Esta configuración permite reducir la reactancia de dispersión a aproximadamente la mitad en comparación con el diseño concéntrico simple.

En la disposición alternada, los devanados primario y secundario se dividen en múltiples bobinas, que se intercalan en las columnas del núcleo. Esta disposición posibilita una mejor distribución de la reactancia de dispersión al ajustar la ubicación relativa de las bobinas. Además, desde el punto de vista mecánico, proporciona una mayor resistencia a los esfuerzos que pueden producirse durante el funcionamiento del transformador, como los generados por cortocircuitos o fluctuaciones de carga.

La elección de la disposición de los devanados responde a diversos factores de diseño, como el enfriamiento, el aislamiento, la reactancia de dispersión y la resistencia a esfuerzos mecánicos, buscando siempre optimizar el rendimiento y la confiabilidad del transformador.

Al construir un devanado, este puede bobinarse en sentido horario o antihorario con respecto a las manecillas del reloj. Se ha observado que una corriente que circula en un determinado sentido genera un flujo magnético en dirección opuesta. Por lo tanto, debe prestarse especial atención a la orientación del devanado, a fin de evitar que las conexiones generen flujos magnéticos o tensiones inducidas en oposición.

En general, cada fabricante adopta un sentido único de bobinado para todas las bobinas, tanto en el devanado primario como en el secundario, asegurando así uniformidad en la construcción y funcionamiento del transformador.

2.3.3. Aislamiento

Los devanados primario y secundario deben estar adecuadamente aislados entre sí. Para ello, se emplean materiales como madera, baquelita u otros aislantes que, además de cumplir su función dieléctrica, contribuyen a la refrigeración del transformador. El aislamiento entre las columnas se logra mediante la separación física de las mismas, utilizando separadores o diafragmas de materiales aislantes

como cartón tratado o baquelita. Estos materiales no solo proporcionan el aislamiento necesario, sino que también contribuyen a la estabilidad mecánica del transformador.

Para lograr este aislamiento, se emplean diversos materiales aislantes, cada uno con propiedades específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones. A continuación, se describen algunos de los materiales más comunes [4]:

1. **Prespan (Clase térmica B - 130 °C)**

   El Prespan es un cartón prensado de alta calidad, fabricado a partir de pulpa de sulfato de celulosa no decolorada. Es un material natural, exento de impurezas, con excelentes propiedades dieléctricas y mecánicas. Se utiliza ampliamente en la fabricación de transformadores sumergidos en aceite, capacitores y piezas aislantes dobladas o troqueladas. Es compatible con fluidos como aceites y siliconas.

2. **Baquelita (Clase térmica H - 180 °C)**

   La baquelita es un material laminado obtenido a partir de hojas de papel especial o tela de algodón impregnadas con resinas fenólicas y comprimidas a alta presión y temperatura. Es conocido por su gran resistencia mecánica y eléctrica. Se utiliza en tablillas terminales, bases para interruptores, separadores para bobinados de motores eléctricos, y en general, en aplicaciones que requieren alta resistencia térmica y dieléctrica.

3. **Papel y Cartón Prensado (Clase térmica B - 130 °C)**

   Este material se provee en planchas o bobinas y se utiliza en transformadores de distribución y potencia refrigerados por aceite. Es conocido por su pureza, resistencia mecánica y capacidad de impregnación con aceite. Se emplea en la fabricación de anillos, segmentos de embocadura y terminales finales en transformadores, adaptándose perfectamente a las condiciones del campo eléctrico dentro del transformador.

4. **Fibra Industrial Roja (Clase térmica B - 130 °C)**

   Producida a partir de celulosas, este material tiene excelentes propiedades mecánicas y dieléctricas. No absorbe aceites, grasas ni solventes orgánicos, y no se carboniza ante descargas eléctricas superficiales. Se utiliza como aislante dieléctrico en aplicaciones electromecánicas, siendo comparable a la fibra vulcanizada.

5. **Nomex (Clase térmica H - 180 °C)**

   El Nomex es un papel sintético compuesto de fibras de aramida, resistente a altas temperaturas y a las llamas. No se funde y mantiene sus propiedades eléctricas y mecánicas incluso a temperaturas superiores a 220 °C. Se utiliza

en aplicaciones que requieren materiales blandos y maleables con alta resistencia térmica, como en transformadores y motores eléctricos.

6. **Mylar (Clase térmica F - 155 °C)**

   El Mylar es un film de poliéster flexible y duradero, con excelentes propiedades dieléctricas y resistencia a la humedad y productos químicos. Sus propiedades dieléctricas lo hacen indispensable para la mayoría de aplicaciones en el sector eléctrico y electromecánico.

2.3.3.1. Conexión de los devanados

Al construir un devanado, el bobinado puede realizarse en sentido horario (hacia la derecha) o antihorario (hacia la izquierda), según el movimiento de las manecillas del reloj. El sentido de la corriente que circula por el devanado determina la dirección del flujo magnético generado, siguiendo la regla de la mano derecha: el campo magnético rodea al conductor en un sentido definido por la dirección de la corriente. Por ello, es necesario definir con precisión la orientación del devanado, ya que influye en la polaridad del flujo magnético y en los voltajes inducidos. Si no se considera adecuadamente, pueden generarse campos magnéticos o voltajes en direcciones opuestas, afectando el funcionamiento del dispositivo.

En los transformadores trifásicos, los devanados pueden conectarse en distintas configuraciones, siendo las más comunes estrella (Y) y delta (Δ) [1]. La elección de la configuración influye en las características operativas del transformador, incluyendo la relación de tensiones y corrientes, la compatibilidad con otros equipos eléctricos y la estabilidad del sistema de potencia.

1. **Conexión en estrella (Y)**

   En la conexión estrella, un extremo de cada uno de los tres devanados se une en un punto común denominado neutro (N), mientras que los otros extremos se conectan a las fases del sistema.

   La presencia del neutro permite la conexión de cargas monofásicas y facilita el equilibrio del sistema. Además, esta configuración reduce el nivel de tensión en cada devanado, lo que disminuye los requerimientos de aislamiento en sistemas de alta tensión, razón por la cual es ampliamente utilizada en la transmisión y distribución de energía eléctrica.

   En esta conexión, la relación entre tensión de línea y tensión de fase es:

$$V_L = \sqrt{3} \, . \, V_F \qquad (2.1)$$

   Mientras que la relación entre la corriente de línea y la corriente de fase es:

$$I_L = I_F \qquad (2.2)$$

2. Conexión delta (Δ)

En la configuración delta, también llamada triángulo, los devanados se conectan en un circuito cerrado triangular, sin un punto de neutro, de modo que cada fase se encuentra entre dos devanados conectados en serie.

Esta configuración no requiere un conductor de neutro, lo que simplifica la infraestructura de cableado, y proporciona una mayor estabilidad ante cargas desequilibradas en comparación con la conexión estrella. Es comúnmente empleada en motores eléctricos y en sistemas de distribución de baja y media tensión.

En este caso, la relación entre tensión de línea y tensión de fase es:

$$V_L = V_F \tag{2.3}$$

Mientras que la relación entre la corriente de línea y la corriente de fase es:

$$I_L = \sqrt{3} \, . \, I_F \tag{2.4}$$

Se puede comparar las configuraciones estrella y delta con la Tabla 2.1:

Configuración	Relación de tensión	Relación de corrientes	Aplicaciones técnicas
Estrella (Y)	$V_L = \sqrt{3} \, . \, V_F$	$I_L = I_F$	Sistemas de alta tensión, distribución eléctrica, conexión de cargas monofásicas
Delta (Δ)	$V_L = V_F$	$I_L = \sqrt{3} \, . \, I_F$	Motores eléctricos, sistemas de baja y media tensión, estabilidad ante cargas desequilibradas

Tabla 2.1 - Tipos de conexión en transformadores. Fuente: Elaboración propia

En los transformadores trifásicos, es común emplear configuraciones híbridas entre los devanados primario y secundario, dependiendo de las necesidades de la red eléctrica.

- Δ-Y (Delta-Estrella): Se utiliza en transformadores elevadores de tensión. La conexión delta en el primario permite manejar corrientes más altas, mientras

que la conexión estrella en el secundario facilita la distribución de energía y la conexión de cargas monofásicas mediante el neutro.

- Y-Δ (Estrella-Delta): Se emplea en transformadores reductores de tensión, donde el devanado primario en estrella soporta tensiones elevadas, y el devanado secundario en delta permite la alimentación de motores eléctricos sin necesidad de un conductor de neutro.
- Y-Y y Δ-Δ: Son menos utilizadas en aplicaciones convencionales debido a problemas asociados con corrientes de secuencia cero y desbalances en la carga. Sin embargo, pueden emplearse con técnicas de compensación adecuadas.

2.3.4. Sistemas de refrigeración del transformador

El calor generado por las pérdidas en los transformadores influye en la vida útil de los aislamientos. Por ello, la disipación eficiente del calor se vuelve una condición necesaria para mantener la temperatura dentro de los límites aceptables según el tipo de aislamiento.

La denominación y características de los sistemas de refrigeración más empleados en transformadores sumergidos en aceite, se resumen en la Tabla 2.2, de acuerdo a la Norma IRAM CEA F 20-99:

Denominación	Función
ONAN (Oil Natural circulation Air Natural circulation)	Refrigeración mediante circulación natural del aceite y del aire en los radiadores
ONAF (Oil Natural circulation Air Forced circulation)	Refrigeración mediante circulación natural del aceite y circulación forzada de aire a través de los radiadores
OFAF (Oil Forced circulation Air Forced circulation)	Refrigeración mediante circulación forzada del aceite (bombas hacia los radiadores) y circulación forzada de aire a través de los radiadores
ODAF (Oil forced circulation Directed Air Forced circulation)	Circulación forzada y dirigida del aceite (bombas de aceite hacia los radiadores y elementos de direccionamiento en el interior del transformador hacia los canales de aceite) y circulación forzada de aire a través de los radiadores.

Tabla 2.2 - Tipos de ventilación. Fuente: IRAM CEA F 20-99

2.3.5. Cuba

La cuba constituye el recipiente que contiene al núcleo, los bobinados y al medio refrigerante. Su principal función es proporcionar soporte mecánico a los componentes internos y facilitar la disipación del calor generado por las pérdidas que se producen durante el funcionamiento del transformador [4].

El calentamiento del transformador depende exclusivamente de la potencia de pérdidas en el hierro y en el cobre que debe disipar. La cuba es el elemento que transmite la temperatura al ambiente, siendo el componente principal del sistema de refrigeración del transformador.

Según la normativa IEC 60076-2, la temperatura máxima del aceite ($\theta_{ac\,max}$) en la parte superior de la cuba no debe exceder los $60°C$ sobre un ambiente de $40°C$, o el valor convenido con el cliente. A este calentamiento máximo le corresponde una elevación media de temperatura interior, que depende de la altura de la caja y de la situación del núcleo y bobinado dentro de la misma.

Si no se dispone de ensayos directos, puede tomarse para el calentamiento medio del aceite ($\theta_{ac\,m}$) un 85% del valor máximo ($\theta_{ac\,max}$):

$$\theta_{ac\,m} = 0,85\,.\,\theta_{ac\,max} \tag{2.5}$$

Existe también una diferencia de temperatura entre el aceite y la superficie exterior de la cuba o radiadores, considerada aproximadamente de $8°C$. El calentamiento superficial de estos elementos (θ_c) determina las posibilidades de disipación térmica del conjunto:

$$\theta_c = \theta_{ac\,m} - 8°C = 0,85\,.\,\theta_{ac\,max} - 8°C \tag{2.6}$$

Como medida de seguridad, si se considera un calentamiento máximo del aceite de $55°C$ ($5°C$ por debajo del límite admisible), el calentamiento medio a prever para la cuba o radiadores será:

$$\theta_c = 0,85\,.\,55°C - 8°C = 40°C \tag{2.7}$$

Es importante destacar que tanto la tapa de la cuba, por la multiplicidad de elementos malos conductores del calor (bornes, conmutadores, etc.), como el fondo, por sus dificultades de radiación y convección, no se consideran entre las superficies útiles de ventilación. Esta limitación se compensa asignando a las superficies laterales coeficientes de refrigeración ligeramente superiores a los reales.

En función de las necesidades de disipación térmica y de la potencia del transformador, se han desarrollado diferentes configuraciones para las cubas. A continuación se describen los tipos de cubas más comunes utilizados en

transformadores trifásicos de distribución, cada uno con características particulares que determinan su aplicación en diferentes rangos de potencia.

1. **Cubas lisas**

   Las cubas lisas se utilizan para transformadores pequeños, de algunos kVA, o para transformadores de mediana y gran potencia que cuentan con radiadores separados o intercambiadores de calor independientes. La Figura 2.7 muestra a un transformador real con cuba lisa.

Figura 2.7 – Transformador con cuba lisa. Fuente [4]

Para el cálculo de la disipación térmica, se consideran únicamente las superficies laterales, excluyendo la tapa y el fondo. La transferencia de calor se produce por radiación y convección, dando en conjunto un coeficiente de refrigeración de aproximadamente $13,4\ W/m^2$ por cada grado centígrado de elevación media de temperatura de la caja.

La superficie lateral necesaria de la cuba se determina mediante la siguiente fórmula:

$$sup_{cuba}[m^2] = \frac{P_t[W]}{13{,}4[\frac{W}{m^2}] \cdot \theta_{ac\,m}[°C]} \qquad (2.8)$$

Donde:

- P_t: pérdidas totales en W
- $\theta_{ac\,m}$: calentamiento medio admisible para la cuba, en °C

2. Cubas con aletas

Las cubas con aletas permiten aumentar la superficie de disipación de calor. Existen principalmente dos tipos de aletas: onduladas y plegadas.La Figura 2.8 muestra a un transformador real con una cuba con aletas .

Figura 2.8 – Transformador con cuba aleteada. Fuente [4]

La superficie de radiación efectiva es la que se desprende del perímetro circunscrito por los radiadores. Para la convección, interviene toda la superficie desarrollada de las aletas, siempre que los canales de aire entre ellas permitan una circulación abundante. Para esto, debe preverse una distancia media entre sus paredes exteriores de 2,5 a 3 veces la del canal interior de aceite.

Las aletas, para ser eficaces, deben comenzar a la altura de los bobinados. Con este tipo de cubas se pueden construir transformadores de hasta $5\ MVA$.

Los coeficientes de disipación térmica varían según las dimensiones de las aletas. Para aletas onduladas con profundidades entre $50\ y\ 400\ mm$, los coeficientes de disipación oscilan entre $260\ y\ 350\ W/m^2$ para una temperatura máxima del aceite de $55°C$. Para aletas plegadas con profundidades similares, los valores están entre $240\ y\ 290\ W/m^2$.

3. Cubas con tubos

Los tubos son elementos refrigeradores muy eficaces debido a la exposición de todo su perímetro a la corriente natural convectiva del aire. Están fabricados de hierro dulce, sin soldadura y con pared delgada (aproximadamente $1\ mm$). A veces se emplean tubos de sección elíptica para mejorar aún más su acción refrigerante. La Figura 2.9 muestra a un transformador real con este tipo de cuba y configuración de refrigeración.

Figura 2.9 – Transformador con cuba con tubos. Fuente [3]

La presencia de los tubos no elimina la cuba lisa, aunque reduce su efectividad a medida que aumenta el número de filas de tubos, que puede variar de 1 a 5. Mediante cubas con tubos se han alcanzado potencias de hasta $20.000\ kVA$.

El coeficiente de disipación de la cuba con tubos varía según el número de filas, siendo del 100% para una fila y descendiendo hasta el 68% para cinco filas. Los coeficientes de disipación por metro lineal de tubo también varían según el diámetro y el número de filas, oscilando entre $23\ y\ 78\ W/m^2$.

2.4. Proceso de cálculo y diseño convencional de transformadores

La Figura 2.10 muestra el diagrama de flujo asociado al diseño convencional de transformadores adoptado por los autores:

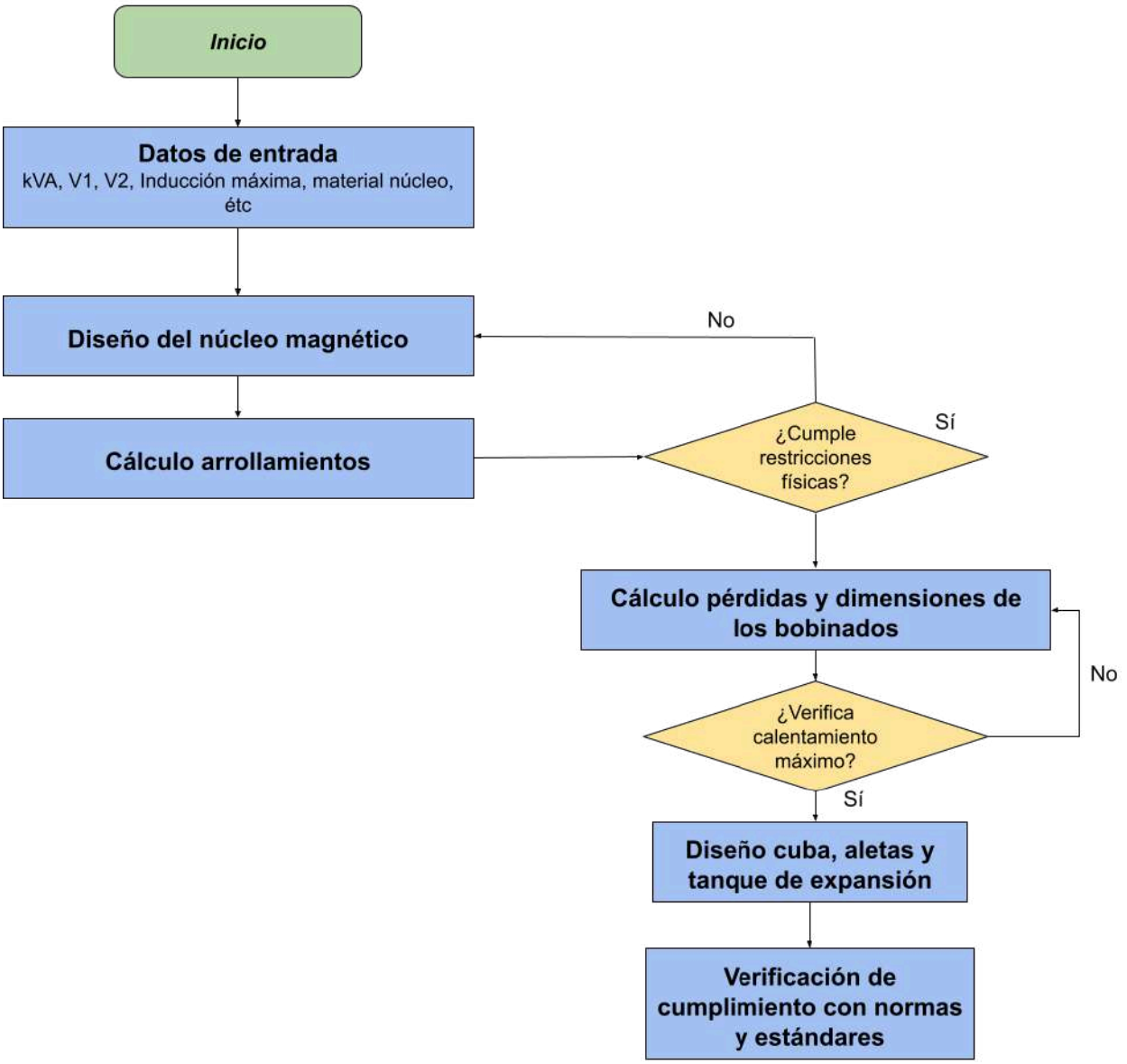


Figura 2.10 – Diagrama de flujo del proceso de cálculo y diseño convencional de transformadores.
Fuente: Elaboración propia

El proceso de cálculo tradicional de un transformador comienza con la definición de los datos de entrada, que incluyen la potencia nominal en kVA, las tensiones primaria y secundaria (V1 y V2), la frecuencia, el material del núcleo, entre otros parámetros técnicos. Estos datos son esenciales para iniciar el diseño.

A continuación, se realiza el diseño del núcleo magnético, en función de las especificaciones y materiales seleccionados. Este diseño debe cumplir con los criterios de eficiencia y tamaño establecidos. Si el núcleo no cumple con las restricciones físicas, como dimensiones máximas o limitaciones de espacio, se debe reajustar el diseño.

Una vez definido el núcleo, se procede al cálculo de los arrollamientos, donde se determina el número de espiras, el calibre del conductor y la disposición de los bobinados. Posteriormente, se verifica que el diseño respete las restricciones físicas generales del conjunto.

Luego, se calculan las pérdidas y dimensiones de los bobinados, considerando tanto las pérdidas en el cobre como las pérdidas en el hierro. Con estos valores, se evalúa si el transformador respeta el límite de calentamiento máximo permitido. Si no es así, se deben ajustar los cálculos y dimensiones.

Cuando el diseño cumple con los requisitos térmicos, se diseña la cuba, las aletas y el tanque de expansión, elementos que permiten la refrigeración y la protección mecánica del transformador.

Finalmente, se realiza la verificación del cumplimiento con normas y estándares, asegurando que el equipo diseñado sea seguro, eficiente y conforme a las especificaciones técnicas y reglamentarias vigentes.

2.5. Optimización en la ingeniería de diseño

La optimización se puede definir como el proceso de obtener el mejor resultado posible dentro de las condiciones y restricciones establecidas. En este sentido, el resultado de una optimización no es absoluto, sino que está condicionado por los parámetros y limitaciones definidas. [3]

De esta forma, el proceso necesita de un objetivo que, para ser alcanzado a través de métodos numéricos, debe ser expresado a través de una función. La optimización, entonces, se trata de maximizar o minimizar dicha *función objetivo*.

2.5.1. Expresión de un problema de optimización

Un problema de optimización en el contexto del diseño y la ingeniería involucra encontrar cuál de todas las alternativas es la que obtiene el mejor resultado. Por lo tanto, la cuestión se puede formular de la siguiente forma:

Hallar $X\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, que minimiza $F(X)$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$g_j(X) < 0;\ con\, j = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ m$

$I_j(X) = 0;\ con\, j = 1,\ 2,\ 3,\ ...,\ p$

Donde:

- X es un vector de dimensión n al que se llamará ***vector de diseño*** y que contendrá a todas las variables con influencia sobre $F(X)$.
- $F(X)$ se denomina la ***función objetivo***.
- $g_j(X)$ son ***restricciones de desigualdad.***
- $I_j(X)$ son ***restricciones de igualdad.***

La dimensión del vector de diseño, n, y la cantidad de restricciones m y p no tienen por qué mantener ningún tipo de relación y, específicamente, al caso en el que $m = p = 0$, se le llama problema de optimización no-restringido.

Llevado a una función sencilla $f(x)$, se puede ver que para el mismo valor de x para el que $f(x)$ es mínima, $-f(x)$ es máxima. Por lo tanto, no se pierde generalidad al definir a la optimización como una minimización, ya que el máximo de una función puede ser hallado buscando el mínimo de la misma función, pero negativa. [5]

2.5.2. Variables de diseño

En el contexto de un diseño ingenieril, existirá una variedad de parámetros que tienen influencia sobre el resultado final. De ellos, algunos pueden tomar un valor fijo en el diseño, en especial, cuando se cuenta con la experiencia o herramientas disponibles como para definirles un valor que sea adecuado. Por otro lado, hay parámetros variables que son los que conformarán al vector de diseño X.

La cantidad de variables consideradas y la importancia relativa que se le asigna a cada una queda en manos de quien resuelve el problema y define la dimensión del vector X. Como se detalla en el presente apartado, la velocidad de respuesta de los métodos de optimización a través de algoritmos depende, principalmente, de la cantidad de variables de diseño. De similar forma, la eficacia del proceso en hallar la que es, verdaderamente, la mejor alternativa, se ve influenciada por la cantidad de parámetros en juego.

Como regla general, siempre es preferente reducir la cantidad de variables de diseño al mínimo posible. Sin embargo, el modelo del problema no debe perder representatividad de la realidad, por lo que no siempre es posible contar con pocos parámetros.

2.5.3. Restricciones del problema

Ya sea por cuestiones prácticas, por disponibilidad material o por criterio del diseñador, existirán límites impuestos a las variables de diseño que conforman al problema de optimización. Estos límites se expresan a través de funciones que pueden ser de igualdad o de desigualdad.

Todo problema de optimización bien formulado requiere de una o varias de estas restricciones. Su presencia influye sobre la cantidad de alternativas de solución que deberá considerar el algoritmo empleado. El respeto por las restricciones prevalece sobre el proceso de optimización, siendo este un requisito indispensable para que una solución sea considerada viable.

Por su naturaleza, se puede clasificar a las restricciones de un problema de diseño en las siguientes categorías:

- **Restricciones funcionales:** son aquellas limitaciones que se le imponen al comportamiento del sistema, generalmente surgen de estándares a cumplir o decisiones estratégicas del proyectista. En el diseño de un transformador , un ejemplo es definir un valor máximo admitido de pérdidas en el cobre, para cumplir con alguna normativa:

  $g_1 \leq 2000\,W$ *dónde* g_1 *son las pérdidas en el cobre de la máquina*

- **Restricciones físicas o geométricas:** son aquellas que surgen por la disponibilidad de materiales o la factibilidad de fabricación. En este caso, un ejemplo es definir una densidad de corriente máxima en los arrollamientos de un transformador:

  $g_2 \leq 3,5\,\frac{A}{mm^2}$ *dónde* g_2 *es la densidad de corriente en el arrollamiento*

Asimismo, más allá de su naturaleza, las restricciones pueden implicar igualdades o desigualdades. Diferenciarlas no es una mera cuestión de clasificación, sino que los algoritmos de optimización las manipulan de distinta manera para encontrar la mejor alternativa, por lo que se las ingresa de forma separada en la programación:

- **Restricciones de igualdad:** son las que más limitan a la optimización ya que reducen las regiones de búsqueda considerablemente. Recurriendo a fundamentos de álgebra lineal, si todas las restricciones de igualdad son linealmente independientes entre sí, para que la optimización tenga lugar, la cantidad de restricciones de este tipo deberá ser, estrictamente, menor que la cantidad de variables de diseño. Esto se debe a que en caso de que haya la misma cantidad de ambas, la optimización se llevaría a cabo sin tener en cuenta a la función objetivo como criterio; ya que basta con las restricciones para hallar una solución. Por otro lado, si hay más restricciones de igualdad que variables de diseño, se cuenta con un sistema sobredeterminado que lleva a un proceso de optimización impreciso.

- **Restricciones de desigualdad:** son aquellas que imprimen menos límites al proceso de optimización, por lo que se dice que es más *flexible.* Aparecen con más frecuencia en los problemas reales que las restricciones de igualdad. [5]

2.5.4. Función objetivo

Existe una variedad de alternativas de diseño que cumplen con todos los requisitos funcionales y físicos impuestos, y la optimización busca hallar la mejor de estas opciones. Por lo tanto, nace la necesidad de comparar a dichas alternativas a través de algún criterio que le asigne mayor mérito a aquellas combinaciones que lo cumplan en mayor medida. Dicho criterio consta de la minimización (o bien, maximización) de algún valor que se expresa como función de la variables de diseño.

Según cómo se plantee el problema de optimización y la técnica metaheurística aplicada, se tratará de enfoque de ***objetivo simple*** o de uno ***multi-objetivo***. Por lo tanto, para resolver un mismo problema, habrá que definir la función objetivo de forma que mejor se ajuste a la técnica utilizada.

3. Técnicas de optimización y su aplicación al diseño de transformadores de distribución

En el presente capítulo se presenta una revisión bibliográfica y de estudios sobre la optimización del diseño de transformadores. Se ahonda en las distintas técnicas de optimización existentes y cuáles son las que mejor se adaptan al objeto del presente trabajo.

La Figura 3.1 clasifica a una parte del universo de métodos de optimización existentes.

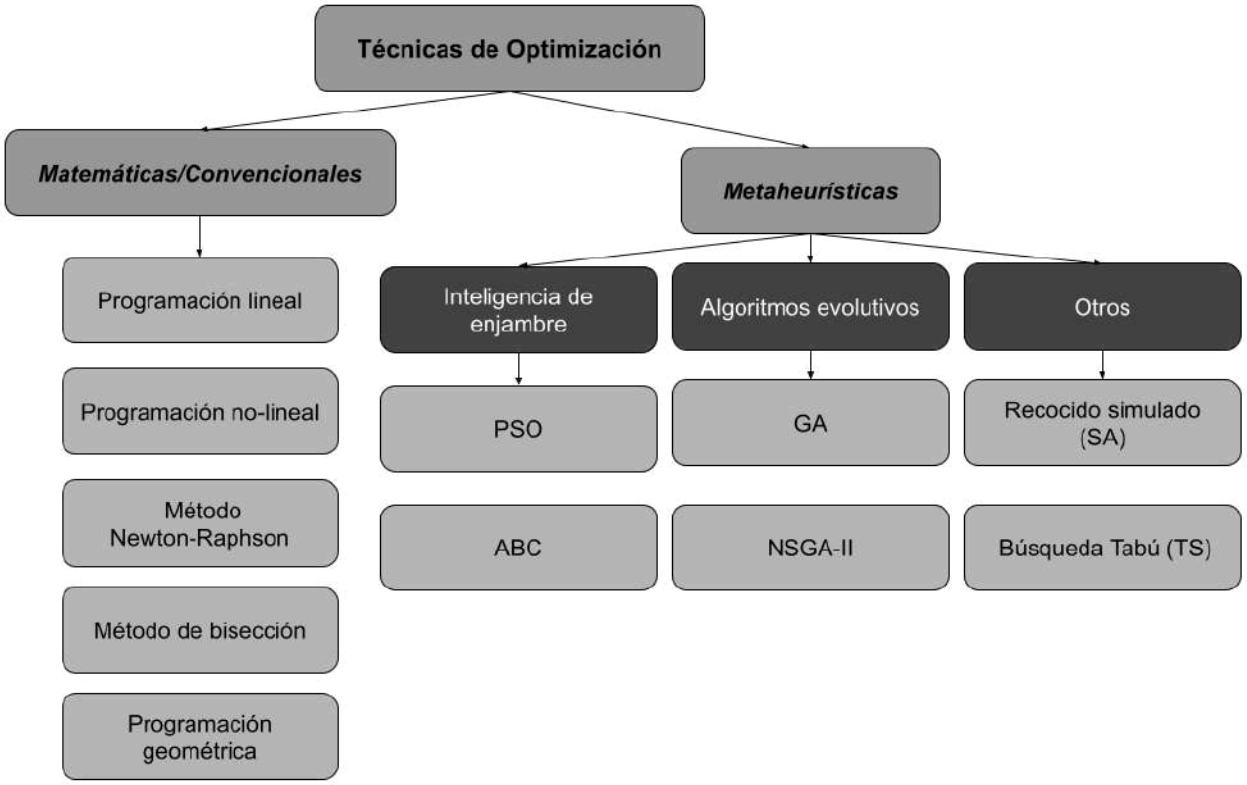


Figura 3.1 – Alguna de las técnicas de optimización existentes.. Fuente: Elaboración propia

3.1. Técnicas de optimización convencionales

Se las llama técnicas de optimización convencionales a aquellas que se basan en principios matemáticos bien definidos y garantizan, bajo ciertas condiciones, la convergencia hacia soluciones óptimas. A pesar de la existencia de diversas alternativas, se abordan las de mayor relevancia y aplicación en forma sucinta ya que no todas son implementadas en el presente trabajo.

3.1.1. Técnicas clásicas con enfoque derivativo

Los métodos clásicos permiten encontrar soluciones óptimas en funciones continuas y derivables. Se basan en el cálculo diferencial y suponen que las funciones son dos veces derivables con derivadas continuas. Sin embargo, estos métodos generan sistemas de ecuaciones no lineales complejos y no son aplicables a funciones no derivables o discontinuas. Aun así, sientan las bases para técnicas numéricas modernas.

Si bien en muchos problemas reales la obtención de derivadas resulta compleja, ya sea por la naturaleza del problema o por las exigencias computacionales, los métodos basados en gradientes son populares y frecuentemente eficaces. Se recomienda su uso cuando la información de derivadas está disponible o es fácilmente calculable. La propiedad de que el gradiente es cero en un óptimo local o global es fundamental para la terminación del proceso de búsqueda. [5]

3.1.1.1. Método de Newton-Raphson

El objetivo de la optimización local sin restricciones es hallar un punto con la mínima derivada posible. El método Newton-Raphson linealiza la primera derivada de la función mediante la expansión de Taylor. Al igualar esta expresión a cero, se obtiene la estimación que sigue. Si el punto actual en la iteración t es $x^{(t)}$, el punto de la siguiente iteración se calcula con la siguiente ecuación (obtenida al considerar sólo el término lineal de la expansión de Taylor):

$$x^{(t+1)} = x(t) - \frac{f'(x^{(t)})}{f''(x^{(t)})} \qquad (3.1)$$

De esta manera, los pasos que sigue este algoritmo son:

Primer paso: Elegir estimación inicial $x^{(1)}$ y un valor de entorno ϵ para el cual terminar las iteraciones. Setear $k = 1$.

Segundo paso: Obtener $f''(x^{(k)})$

Tercer paso: Calcular $x^{(k+1)} = x(k) - \frac{f'(x^{(k)})}{f''(x^{(k)})}$ y obtener $f'(x^{(k+1)})$

Cuarto paso: Si $\left|f'(x^{(k+1)})\right| < \epsilon$, terminar ejecución. Sino, setear $k = k + 1$ y volver al segundo paso.

La convergencia del algoritmo depende del punto inicial y de la naturaleza de la función objetivo. En el caso de funciones matemáticas, la derivada puede ser sencilla de calcular, pero en la práctica, los gradientes deben ser computados numéricamente, lo cual complejiza la aplicación. [5]

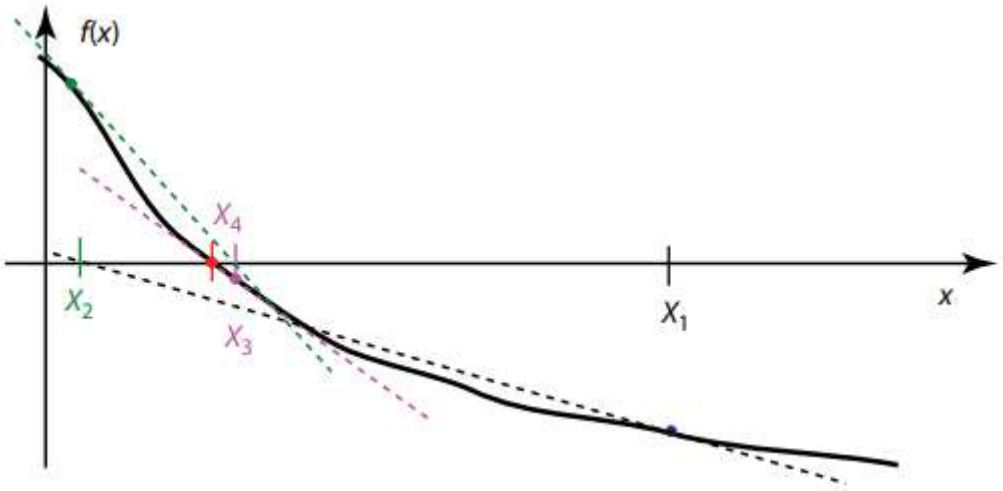


Figura 3.2 – Representación gráfica del método de Newton-Raphson. Fuente [5]

3.1.1.2. Método de bisección

El método de bisección, también conocido como dicotomía, es un algoritmo numérico para encontrar las raíces de una ecuación, que funciona dividiendo un intervalo en dos mitades y seleccionando el subintervalo que contiene la raíz. Se basa en el teorema de Bolzano, que establece que si una función continua cambia de signo en un intervalo, entonces debe haber una raíz en ese intervalo.

El método Newton-Raphson requiere el cálculo de la segunda derivada, lo que implica tres evaluaciones de la función. En contraste, el método de la bisección evita esta complejidad, utilizando únicamente la primera derivada. Se emplea el valor de la función y el signo de la primera derivada en dos puntos para descartar una porción del espacio de búsqueda.

Utilizando la información de la derivada, se considera que el mínimo está "acotado" en el intervalo (a,b) si se cumplen dos condiciones: $f'(a) < 0$ y $f'(b) > 0$. Como otros métodos de eliminación de región, este algoritmo también necesita dos puntos iniciales que acoten el mínimo. Un algoritmo de acotación puede utilizarse para hallarlos. En el método de la bisección, se calculan y comparan las derivadas en los dos puntos límite y en el punto medio. De los tres, se eligen para la siguiente iteración los dos puntos consecutivos cuyas derivadas tengan signos opuestos. [5]

De esta manera, los pasos que sigue este algoritmo son:
Primer paso: Elegir dos puntos a y b tales que $f'(a) < 0$ y $f'(b) > 0$ y un valor de entorno ϵ para el cual terminar las iteraciones. Setear $x_1 = a$ y $x_2 = b$

Segundo paso: Calcular $z = \frac{x_1 + x_2}{2}$ y evaluar $f'(z)$

Tercer paso: Si $|f'(z)| < \epsilon$, terminar ejecución. Sino:

Si $f'(z) < 0$ setear $x_1 = z$ y volver al segundo paso.

Si $f'(z) > 0$ setear $x_2 = z$ y volver al segundo paso.

El signo de la primera derivada en el punto medio permite eliminar mitad de la región de búsqueda.

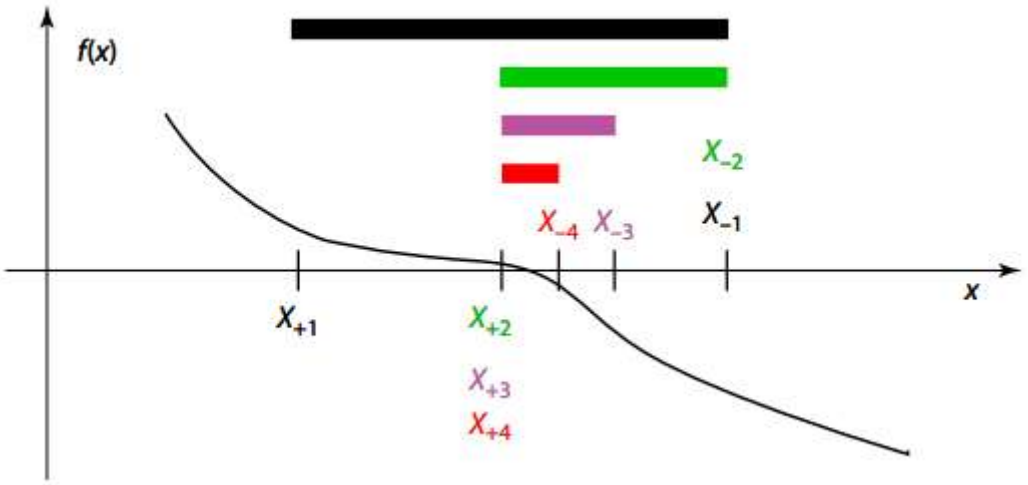


Figura 3.3 – Representación gráfica del método de bisección. Fuente [5]

3.1.2. Programación lineal (Linear Programming)

La Programación Lineal (PL) es una técnica matemática utilizada para optimizar (maximizar o minimizar) una función objetivo lineal, sujeta a un conjunto de restricciones lineales. Los métodos de optimización en PL se basan en la idea de que la solución óptima se encuentra en uno de los vértices (puntos extremos) de la región factible, que es el conjunto de todas las soluciones que satisfacen las restricciones.

El método más conocido y ampliamente utilizado es el Método Simplex. Este algoritmo iterativo comienza en un vértice de la región factible y se mueve sistemáticamente a vértices adyacentes, mejorando el valor de la función objetivo en cada paso, hasta que se alcanza la solución óptima. [6]

3.1.3. Programación no-lineal (Non-linear programming)

Existen métodos de búsqueda directa (sin derivadas) y de descenso (con derivadas). Los métodos directos, también llamados de orden cero, son útiles para problemas pequeños. Los métodos de descenso, o de gradiente, son más eficientes, utilizando derivadas de primer o segundo orden. Todos son iterativos, parten de una solución inicial y avanzan paso a paso hacia el óptimo. Los métodos indirectos tratan restricciones mediante secuencias de problemas no restringidos.

3.1.4. Programación geométrica

La Programación Geométrica (GP) es un método de optimización desarrollado por C. Zener en 1961, diseñado específicamente para resolver problemas de Programación No Lineal (NLP). Su particularidad radica en que solo se aplica a funciones que pueden expresarse en una forma llamada posinomial. Esto significa que la función es una suma de términos, donde cada término es un producto de variables elevadas a cualquier potencia real, y todos los coeficientes deben ser positivos. Además, todas las variables en la función deben tomar solo valores positivos.

Una función polinomial es aquella que toma la siguiente forma:

$$f(x) = \sum_{t=1}^{T} c_t \prod_{i=1}^{N} x_i^{a_{it}} \qquad (3.2)$$

Donde $c_t > 0$ y a_{it} es cualquier número real. Además, todas las variables x_i pueden sólo tomar valores positivos (de allí el nombre posinomios). Si el problema principal no está expresado en forma polinomial, en ocasiones se pueden realizar cambios de variable para alcanzar dicha forma.

3.1.5. Optimización combinatoria

Este método busca soluciones óptimas dentro de un conjunto finito de opciones, comúnmente discreto. Aunque un enfoque directo sería enumerar todas las soluciones (fuerza bruta), esto no es viable en problemas grandes por la explosión combinatoria. Métodos más eficientes eliminan clases de soluciones inviables. En diseño de transformadores, esta técnica es parcialmente útil porque algunas variables se eligen de catálogos o valores normalizados.

3.1.6. Aplicabilidad de las técnicas de optimización convencionales al diseño de transformadores

La Tabla 3.1 presenta, de forma resumida, las ventajas y desventajas de los métodos tradicionales mencionados en las secciones anteriores, así como su aplicabilidad en el problema estudiado en el presente trabajo.

Técnica	Características principales	Ventajas principales	Limitaciones	Aplicabilidad en diseño de transformadores
Clásicas - derivativas	Requieren de funciones derivables y continuas. Usan cálculo diferencial	Rigurosa y con base matemática sólida	No aplicable a funciones no derivables y/o discretas	Limitada (las variables no siempre son continuas)
Programación lineal	Funciones lineales con restricciones lineales	Eficiente con muchos algoritmos y permite análisis de sensibilidad	Requiere linealidad estricta	Moderada (sólo es útil si se linealiza el problema)
Programación no-lineal	Métodos iterativos; usan derivadas (gradiente) o solo valores de la función (directa)	Mayor flexibilidad que PL; aptos para funciones reales	Requiere de cambios de variables que pueden alterar el problema.	Moderada (sólo para aquellas variables continuas del diseño)
Programación geométrica	Funciones posinomiales; se centra en magnitudes relativas	Puede simplificar problemas complejos a ecuaciones lineales	Solo aplicable a funciones en forma de posinomios	Baja (requiere formato específico de funciones)
Optimización combinatoria	Conjunto de soluciones discreto; búsqueda óptima entre combinaciones	Ideal cuando se eligen elementos de catálogos o valores fijos	Alta carga computacional para analizar todas las opciones disponibles	Moderada (sólo útil para variables de elección discreta como Nro de vueltas o secciones de conductores)

Tabla 3.1 - Características de las técnicas de optimización convencionales. Fuente: Elaboración propia

Es evidente que ninguna de estas técnicas de optimización resulta totalmente adecuada para el diseño de transformadores ya que todas requieren de funciones con alguna forma específica o de variables plenamente continuas o discretas. Este es el motivo por el cual se recurre a técnicas metaheurísticas de optimización, que si bien no aseguran encontrar un resultado óptimo absoluto, presentan mayor aplicabilidad en problemas complejos de ingeniería. [7]

3.2. Técnicas de optimización metaheurísticas

Las metaheurísticas son técnicas de optimización y resolución de problemas computacionales que, a diferencia de los métodos exactos, no garantizan encontrar la solución óptima global, pero sí soluciones de muy alta calidad en un tiempo razonable, especialmente para problemas complejos y con muchas variables de diseño interrelacionadas de forma no lineal.

En general, las metaheurísticas toman inicialmente una solución factible, la cual es luego mejorada usando heurísticas de mejoramiento embebidas en una estructura más general. La característica común de estos enfoques es el uso de mecanismos para encontrar en lo posible soluciones óptimas evadiendo óptimos locales. Las metaheurísticas pueden manejar variables discretas y reales, siendo aplicadas en la actualidad a una amplia gama de problemas de optimización de manera efectiva. [8]

3.2.1. Algoritmo genético (GA)

Los Algoritmos Genéticos (Genetic algorithm en inglés, o GA) son técnicas de optimización inspiradas en los principios de la evolución biológica, como la selección natural, la mutación y la recombinación genética. Estos algoritmos son especialmente útiles para resolver problemas de optimización complejos, tanto continuos como discretos, donde las técnicas tradicionales pueden fallar debido a la no linealidad, la multimodalidad o el gran tamaño del espacio de búsqueda.

3.2.1.1. Relación con la biología

En la naturaleza, los organismos más aptos tienen más probabilidades de sobrevivir y reproducirse, transmitiendo sus genes a la siguiente generación. Con el tiempo, este proceso conduce a la evolución de especies mejor adaptadas a su entorno. Los Algoritmos Genéticos imitan este proceso utilizando una población de soluciones candidatas, que evolucionan a lo largo de varias generaciones para encontrar soluciones óptimas o cercanas a óptimas.

3.2.1.2. Etapas del algoritmo genético

Los Algoritmos Genéticos siguen un flujo iterativo que simula el proceso de evolución. A continuación, se describen las etapas principales:

1. **Inicialización**

   En esta etapa, el algoritmo genera una población inicial creando individuos válidos en forma aleatoria, según los límites impuestos por el usuario para cada variable de diseño.
   Se generan tantos individuos como se haya definido el tamaño de la población. Cada uno de estos individuos es una posible solución y será un vector cuya dimensión (o bien, cantidad de genes) es igual a la cantidad de variables de diseño.

2. **Elitismo**

   El elitismo en un algoritmo genético es una técnica que asegura que los mejores individuos (soluciones) de cada generación se conserven y se transmitan directamente a la siguiente generación, sin ser alterados por los procesos de cruce o mutación. Esto garantiza que las soluciones de alta calidad no se pierdan durante el proceso evolutivo, lo que ayuda a acelerar la convergencia hacia una solución óptima o cercana a la óptima. Al aplicar el elitismo, se incrementa la probabilidad de mantener y mejorar las mejores características de la población a lo largo de las generaciones.

   Según mejor se adapte al problema a resolver, se puede optar por aumentar o disminuir el elitismo, conservando inalterados a más o menos individuos entre generación y generación.

3. **Mutación**

   La mutación en un algoritmo genético introduce cambios aleatorios en los individuos para mantener la diversidad genética y evitar que el algoritmo se quede atrapado en óptimos locales. Este proceso ayuda a explorar nuevas soluciones en cada generación.

   La probabilidad de que ocurra una mutación, cuántos genes se mutan y sobre cuántos y cuáles individuos se hace son cuestiones que quedan en mano del programador que deberá optar según mejor se ajuste al problema a resolver.

   Existen muchas formas de mutar los genes: en forma aleatoria, siguiendo alguna lógica, respetando una distribución uniforme, entre otras.

4. **Cruce**

   El cruce en un algoritmo genético es el proceso en el que dos individuos (padres) intercambian parte de su información genética para crear nuevos individuos (hijos). Esto permite combinar características de ambos padres y explorar nuevas soluciones, favoreciendo la evolución hacia mejores resultados.

Todas estas etapas pueden ser adaptadas y ajustadas según las características del problema específico que se está resolviendo. Por ejemplo, el tipo de selección, la tasa de cruce o mutación, e incluso la forma en que se representan las soluciones pueden modificarse para mejorar el rendimiento del algoritmo en un contexto particular. Además, la frecuencia con la que se aplican estos operadores puede variar: en algunos casos, puede ser beneficioso realizar cruces y mutaciones con mayor frecuencia, mientras que en otros, se prefiere un enfoque más conservador.

3.2.2. Algoritmo NSGA-II

El algoritmo genético de clasificación no-dominada II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II en inglés) opera de manera evolutiva de forma similar

al método previamente explicado. Su principal diferencia radica en que es un algoritmo multi-objetivo, lo que elimina la necesidad de combinar diferentes objetivos, generalmente conflictuantes, en una única función objetivo. En lugar de ello, este método evalúa por separado los distintos objetivos para cada posible solución, guardando aquellas que se consideran **no-dominadas**.

3.2.2.1. Concepto de solución no-dominada

Se les llama soluciones **no-dominadas** a aquellas para las cuales no existe otra solución que haya obtenido mejores resultados en todos los objetivos analizados.

Llevado al caso de estudio, para que una solución sea no-dominada, el algoritmo no debe haber encontrado ninguna otra solución que tenga, simultáneamente, menores pérdidas y menor costo de materiales, ya que estos son los dos objetivos analizados en el presente trabajo.

En la Tabla 3.2 se clarifica este concepto a través de un ejemplo con 5 soluciones con valores arbitrarios de costos y pérdidas:

Solución	Costo Materiales[$]	Pérdidas [W]	Estado
$Solución\ 1$	5000	100	**Dominada por la solución 4**
$Solución\ 2$	7000	80	**Dominada por la solución 3**
$Solución\ 3$	6000	70	**No-dominada**
$Solución\ 4$	4000	90	**No-dominada**
$Solución\ 5$	3000	120	**No-dominada**

Tabla 3.2 - Ejemplo de soluciones dominadas y no-dominadas. Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2. Frente de Pareto

Al graficar todas las soluciones no-dominadas en un diagrama con ejes que representan cada uno de los múltiples objetivos analizados, se obtiene como resultado el **frente de Pareto**.

En el problema de optimización actual, se tratará de una gráfica de dos ejes (Pérdidas W vs. Costo Materiales $\$$). Si se aplica este concepto al ejemplo de la Tabla 3.2, se obtiene el gráfico de la Figura 3.4.

El frente de Pareto cuenta con las siguientes características:

1. **Compensación (trade-off)**: Al moverse a lo largo del frente de Pareto, se mejora en un objetivo pero se empeora en otro. Por ejemplo:
    - Al moverse de la Solución 3 a la Solución 4, se reduce el costo de $6000 a $4000, pero las pérdidas aumentan de 70 W a 90 W.
    - Al moverse de la Solución 4 a Solución 5, se reduce el costo de $4000 a $3000, pero las pérdidas aumentan de 90 W a 120 W.
2. **Ninguna solución en el frente es objetivamente mejor que otra**: Cada solución en el frente de Pareto representa un equilibrio diferente entre los objetivos. La elección de una solución específica depende de las preferencias o restricciones adicionales.
3. **Cualquier solución que no está en el frente puede ser mejorada**: Las soluciones 1 y 2 están dominadas porque existen otras soluciones que son mejores en todos los objetivos o al menos iguales en un objetivo y mejores en los demás.

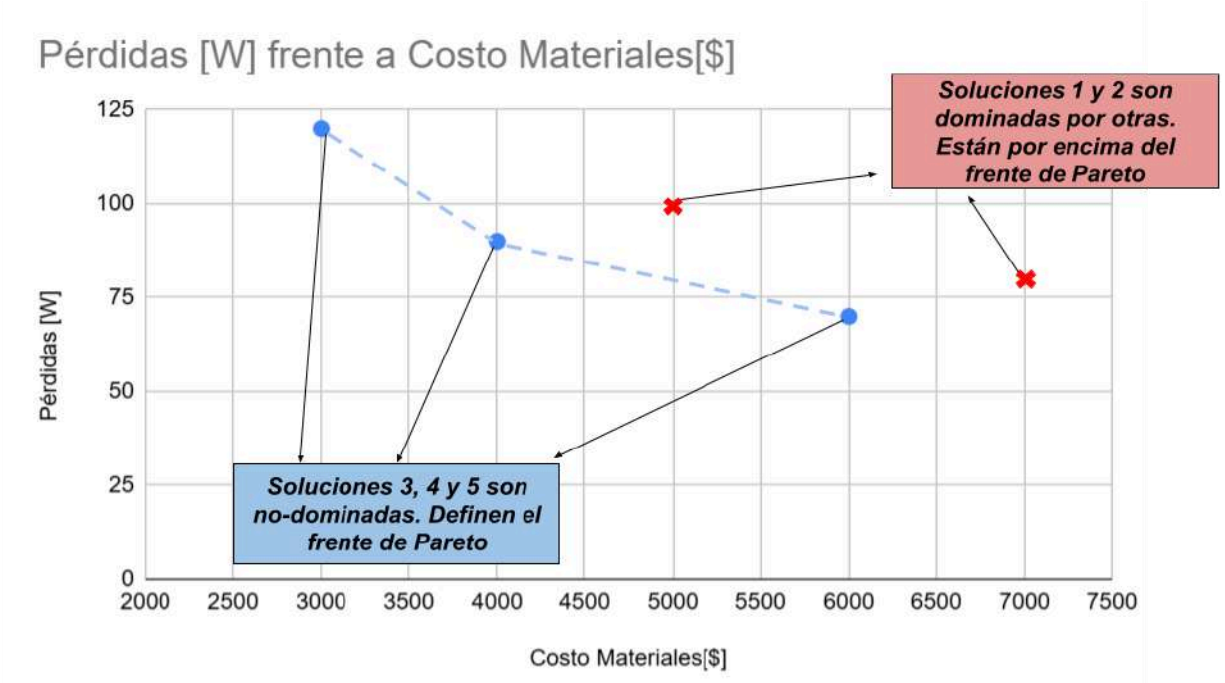


Figura 3.4 – Representación gráfica del frente de Pareto e identificación de soluciones no-dominadas.
Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Algoritmo de recocido simulado (SA)

El Recocido Simulado (SA, por sus siglas en inglés) es una técnica de optimización inspirada en un proceso físico utilizado en metalurgia: el recocido de materiales. Este método es especialmente útil para resolver problemas combinatorios complejos, como la planificación de rutas, la asignación de recursos o el diseño de

circuitos, donde las técnicas de optimización tradicionales suelen fallar debido a la naturaleza no lineal, no diferenciable o no convexa de estos problemas.

3.2.3.1. El proceso físico de recocido y su analogía con la optimización

En metalurgia, el recocido es un proceso en el que un material sólido se calienta a altas temperaturas y luego se enfría lentamente. Este tratamiento permite que los átomos del material se reorganicen, formando estructuras cristalinas más ordenadas y estables, con una energía interna mínima. Un enfriamiento lento es crucial para evitar defectos en la estructura cristalina, ya que permite que el material alcance un estado de equilibrio térmico en cada etapa del proceso.

El recocido simulado toma prestada esta idea para aplicarla a la optimización combinatoria. En este contexto:

- **Configuraciones**: Representan posibles soluciones al problema.
- **Energía**: Corresponde al costo o valor de la función objetivo que se desea minimizar.
- **Temperatura**: Es un parámetro de control que regula la probabilidad de aceptar soluciones peores (movimientos "cuesta arriba") durante la búsqueda.

El objetivo del algoritmo es encontrar la configuración con el menor costo total (en materiales y en energía de pérdidas) posible, evitando quedar atrapado en óptimos locales (soluciones subóptimas).

3.2.3.2. Etapas del algoritmo de recocido simulado

El algoritmo imita el proceso de recocido de metales, y permite explorar el espacio de soluciones de forma controlada, incluso aceptando movimientos que temporalmente empeoran la función objetivo, lo que le permite escapar de mínimos locales y buscar el óptimo global de forma más robusta. A continuación, se describe la secuencia de pasos fundamentales del recocido simulado:

1. **Inicialización:**
   - Configuración inicial (G_o): Se elige una solución inicial al problema, que puede ser generada aleatoriamente o mediante una heurística simple .
   - Temperatura inicial (T_o): Se establece una temperatura inicial, generalmente alta, de por ejemplo $1000°C$, que permite una exploración amplia del espacio de soluciones.
   - Programa de enfriamiento: Se define cómo se reducirá la temperatura a lo largo del tiempo, por ejemplo, $T_{n+1} = \alpha T_n$, donde α es un factor de enfriamiento entre 0 y 1.

2. **Bucle principal:**

- Generación de una nueva configuración (G_j): A partir de la configuración actual G_i, se genera una nueva configuración G_j aplicando una pequeña perturbación.
- Evaluación de la nueva configuración: Se evalúa la nueva configuración a través de la función objetivo $v(G_j)$, y se compara con el valor de la configuración actual $v(G_i)$.
- Criterio de aceptación:
  - Si $v(G_j) \leq v(G_i)$ se acepta G_j como la nueva configuración actual.
  - Si $v(G_j) > v(G_i)$, existe una probabilidad de que sea aceptada, dada por la *regla de Metropolis*:

$$P = e^{-(\frac{v(G_j)-v(G_i)}{T})} \quad (3.3)$$

Donde:

- P: Probabilidad de que la nueva configuración sea aceptada.
- $v(G_j)$: Configuración nueva.
- $v(G_i)$: Configuración actual.
- T: Temperatura actual.

Esto permite aceptar soluciones peores con cierta probabilidad, lo que ayuda a escapar de los óptimos locales.

- Reducción de temperatura: Una vez que se ha realizado un número de iteraciones a la temperatura actual, se reduce la temperatura según el programa de enfriamiento.

3. **Terminación:**

- El algoritmo termina cuando la temperatura alcanza un valor mínimo T_{min} o después de un número máximo de iteraciones.
- La configuración actual en este punto se considera la solución aproximada al problema.

3.2.3.3. Parámetros del algoritmo SA

La Tabla 3.3 describe a los parámetros que forman parte de este algoritmo y su influencia sobre el funcionamiento:

Parámetro	Descripción	Rango típico de uso
$Temperatura\ máxima$ (T_{max})	Si es alta, permite que el algoritmo acepte una gran proporción de soluciones peores al inicio y no limite su exploración (exploración amplia). Si es baja, rechaza peores soluciones y puede limitar su campo de exploración.	$1°C\ a\ 1000\ °C$
$Temperatura\ mínima$ $(T_{mín})$	Debe ser lo suficientemente baja para que el algoritmo deje de aceptar soluciones peores y converja a una solución estable.	$10^{-1}\ °C\ a\ 10^{-3}\ °C$
$Energía/Función\ Objetivo$ (E)	Representa el valor de la función objetivo que se desea minimizar. El algoritmo busca encontrar el menor valor de energía posible.	*Depende del problema a optimizar y de cómo se defina.*
$Factor\ de\ enfriamiento$ (α)	Determina la tasa de reducción de la temperatura. Mientras más bajo este factor, más rápido disminuye la temperatura y el algoritmo se hace exigente más rápidamente (comienza a descartar peores soluciones más rápido)	$0,8\ a\ 0,99$
$Iteraciones$ (N_{it})	Número de veces que se genera y evalúa una nueva configuración	$10\ a\ 1000$
$Criterio\ de\ aceptación$ (P)	Probabilidad de que una configuración de mayor energía sea aceptada.	$0\ a\ 1$

Tabla 3.3 - Parámetros del Simulated Annealing. Fuente: Elaboración propia

(3.4)

3.2.4. Enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization - PSO)

El algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) inicia con una población de soluciones candidatas distribuidas aleatoriamente en un espacio de búsqueda multidimensional. Cada una de estas "partículas" se representa mediante un vector.

El PSO busca el óptimo actualizando la posición de cada partícula en base a su velocidad y a dos referencias clave: su mejor posición personal histórica y la mejor posición global encontrada por todo el enjambre. La velocidad, también un vector, determina el siguiente movimiento de la partícula, pero este no es puramente aleatorio, ya que es atraído hacia estos puntos óptimos.

Tras cada movimiento, la calidad de la nueva posición de cada partícula se evalúa usando la función objetivo. La partícula con el mejor valor global se denomina gB (*global best*). Además, cada partícula compara su posición actual con la recién generada; si la nueva es superior, la reemplaza, convirtiéndose en su lB (*local best*). Las nuevas posiciones y velocidades se calculan considerando el valor del mejor elemento global y la posición actual de cada partícula, junto con un factor aleatorio.

Este proceso iterativo de evaluación y ajuste de posiciones y velocidades permite al enjambre converger hacia soluciones óptimas, guiado por la experiencia individual y colectiva.

3.2.4.1. Etapas del PSO

1. **Inicialización**

   La fase de inicialización es fundamental en los algoritmos metaheurísticos, como la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). Su objetivo principal es la creación de la población inicial de partículas, donde cada partícula representa una solución candidata al problema de optimización.

   En esta etapa, las partículas se generan aleatoriamente dentro de un espacio de búsqueda definido por límites inferiores y superiores preestablecidos. Este proceso asegura una distribución inicial diversa de posibles soluciones. Adicionalmente, la fase de inicialización establece los parámetros específicos del problema que se busca optimizar.

2. **Velocidad y movimiento de la partícula**

   La posición de la partícula i en la iteración t queda expresada como la coordenada $X^i(t) = (x^i(t), y^i(t))$. Asimismo, su velocidad está dada por $V^i(t) = (v_x^i(t), v_y^i(t))$. En la siguiente iteración, se actualiza la posición de la partícula según:

$$X^i(t+1) = X^i(t) + V^i(t)$$

Por otro lado, las velocidades se actualizan según la siguiente regla:

$$V^i(t+1) = wV^i(t) + c_1 r_1 (lB^i - X^i(t)) + c_2 r_2 (gB^i - X^i(t)) \qquad (3.5)$$

Donde r_1 y r_2 son números aleatorios entre 0 y 1, las constantes w, c_1 y c_2 son parámetros que se definen previamente al algoritmo, lB^i es la posición que resultó en el mejor valor de la función objetivo $f(X)$ para la partícula i y gB^i la posición del mejor resultado de todas las partículas del enjambre.

3. **Inercia (w)**

   Al parámetro w se le llama coeficiente de inercia. Su valor, entre 0 y 1, determina cuánto la partícula mantendrá su velocidad previa, es decir, la inercia en su dirección y magnitud de búsqueda.

4. **Coeficientes de exploración y explotación (c_1 y c_2)**

   Los parámetros c_1 y c_2 se denominan coeficientes cognitivo y social, respectivamente. Estos controlan la importancia relativa entre refinar la búsqueda basada en la experiencia propia de la partícula y reconocer los resultados del resto del enjambre. En esencia, ajustan el balance entre la exploración de nuevas áreas y la explotación de soluciones conocidas.
   La Figura 3.5 muestra las características del movimiento de una partícula del enjambre:

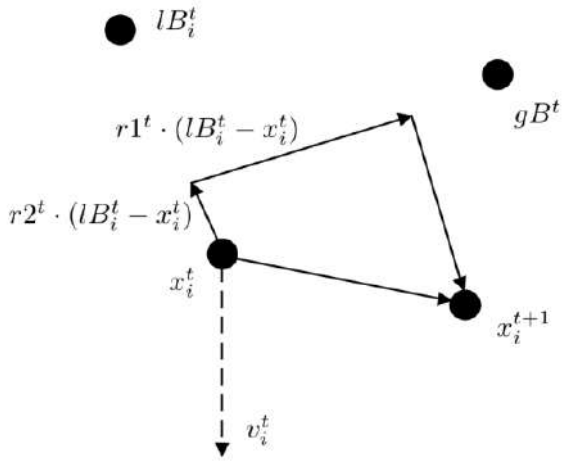


Figura 3.5 – Posición y movimiento de una partícula del enjambre. Fuente [3]

3.2.5. Búsqueda Tabú (Tabu Search - TS)

El algoritmo de Búsqueda Tabú (TS) es una metaheurística que inicia su proceso de optimización desde una solución inicial (a menudo generada de forma aleatoria o

heurística) en un espacio de búsqueda. A diferencia de otros métodos que exploran múltiples soluciones simultáneamente, TS se centra en la mejora iterativa de una única solución a lo largo del tiempo.

El TS busca el óptimo explorando el vecindario de la solución actual. En cada paso, evalúa las soluciones vecinas y se mueve hacia la que ofrece la mejor mejora, incluso si esa mejora es solo local. La clave de TS para evitar quedar atrapado en óptimos locales es el uso de una memoria flexible conocida como lista tabú. Esta lista registra movimientos o características de soluciones visitadas recientemente, haciendo que sean "tabú" (prohibidas) por un número determinado de iteraciones. Esto fuerza al algoritmo a explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda.

Aun cuando un movimiento esté en la lista tabú, el TS incorpora un mecanismo de criterio de aspiración. Este criterio permite que un movimiento tabú sea aceptado si conduce a una solución que es significativamente mejor que cualquiera encontrada hasta el momento, o si cumple alguna otra condición predefinida que justifique romper la prohibición.

Este proceso iterativo de explorar vecinos, usar la lista tabú para evitar ciclos y aplicar criterios de aspiración permite al algoritmo TS escapar de óptimos locales y explorar el espacio de soluciones de manera eficiente, buscando la mejor solución posible.

3.2.5.1. Etapas de la Búsqueda Tabú

Inicialización

La fase de inicialización en la Búsqueda Tabú es el punto de partida del algoritmo. Su propósito principal es la generación de una solución inicial para el problema de optimización. Esta solución puede ser creada de manera aleatoria o mediante una heurística constructiva que ofrezca un buen punto de partida. Es crucial establecer la estructura de la lista tabú, incluyendo su tamaño y el tipo de información que almacenará (por ejemplo, movimientos prohibidos o atributos de las soluciones).

Movimientos y lista tabú

En cada iteración, la Búsqueda Tabú explora el vecindario de la solución actual, identificando un conjunto de soluciones candidatas para el siguiente paso. De estas candidatas, se selecciona la que ofrece la mejor mejora en la función objetivo y no está en la lista tabú.

La lista tabú funciona como una memoria a corto plazo, registrando los movimientos o características de las soluciones que se han visitado recientemente. Si un movimiento que conduciría a una solución ya explorada (y potencialmente un ciclo) se encuentra en la lista tabú, este movimiento se prohíbe temporalmente.

La duración de esta prohibición es un parámetro clave del algoritmo. Una vez que un elemento ha permanecido en la lista tabú por su duración establecida, se retira, permitiendo que el movimiento o característica vuelva a ser considerado.

Criterio de Aspiración

El criterio de aspiración es una característica importante de la Búsqueda Tabú que proporciona flexibilidad. Aunque un movimiento esté prohibido por la lista tabú, el criterio de aspiración puede invalidar esta prohibición si el movimiento lleva a una solución que es significativamente mejor que la mejor solución encontrada hasta el momento. Esto permite que el algoritmo no descarte prematuramente rutas prometedoras solo porque cumplen una condición tabú. En esencia, el criterio de aspiración actúa como una "escapatoria" de la lista tabú bajo condiciones favorables.

Estos elementos combinados (exploración de vecinos, lista tabú y criterio de aspiración) permiten a la Búsqueda Tabú realizar una exploración robusta y efectiva del espacio de soluciones, evitando ciclos y escapando de óptimos locales. [5]

3.3. Estado del arte en materia de optimización de transformadores

La optimización del diseño de transformadores ha sido un campo de estudio extenso, con numerosas investigaciones enfocadas en la mejora de las propiedades de los materiales. Sin embargo, este enfoque no siempre es práctico ni aplicable en todas las situaciones. Otras líneas de investigación han explorado el uso de diversas técnicas de optimización para seleccionar los valores ideales de las variables de diseño, partiendo de las propiedades de los materiales ya existentes.

Por ejemplo, Eleftherios I. Amoiralis y Pavlos S. Georgilakis [9] desarrollaron una metodología para el diseño óptimo de transformadores de potencia utilizando un número mínimo de parámetros de entrada. Utilizaron cinco variables de diseño pero a todas se les realizó una restricción elevada. Su enfoque se basó en un método de optimización por árbol de decisión. Si bien este último es fácil de usar, su programación resulta compleja, ya que requiere la construcción de una base de conocimiento fundamentada en más de 2500 diseños previos. Otra investigación, llevada a cabo por Li Hui, Han Li y He Bie, en un estudio publicado en 2007, presentó la aplicación de un algoritmo genético mejorado (IGA) para el diseño de transformadores de potencia [10]. El objetivo de este IGA era superar los inconvenientes comunes de los algoritmos genéticos simples, aunque su diseño se limitó al uso de tiras de cobre rectangulares en los devanados primario y secundario, y es importante señalar que los transformadores de distribución a menudo emplean una construcción de devanado distinta a la de los transformadores grandes.

Mohammed Yousef Abu-Sada [11] también realizó un trabajo relevante en 2008 sobre el diseño de transformadores convencionales de manera costo-efectiva. Empleó dos técnicas de optimización: la optimización no lineal y la optimización genética, ambas consideradas técnicas de optimización continua. Si bien son herramientas potentes, a menudo arrojan soluciones óptimas con valores de variables poco prácticos. Esto se debe a que muchas variables en el diseño de transformadores deben ser números enteros o ajustarse a valores estándar.

Abu-Sada abordó este problema redondeando los valores de las variables obtenidos para considerarlos como parte de un diseño óptimo. No obstante, expertos como el autor del libro *"Engineering Optimization, Theory and Practice"* [7], advierten que, aunque es posible redondear valores óptimos de técnicas continuas, en muchos casos resulta complicado hacerlo sin violar las restricciones del diseño. Frecuentemente, el redondeo de ciertas variables exige cambios sustanciales en otras para satisfacer todas las limitaciones, y la solución redondeada puede alejarse considerablemente del verdadero valor óptimo. Todos estos inconvenientes se evitan si el problema de optimización se plantea y resuelve directamente como un problema de programación entera.

En definitiva, gran parte de estos estudios previos se centran en encontrar una única solución óptima utilizando herramientas de optimización para variables continuas y luego redondeando sus valores, lo cual no siempre es lo más adecuado para las variables de diseño específicas de los transformadores. Además, pocas investigaciones previas han formulado el diseño de transformadores como un problema de optimización que integre el costo de las pérdidas en la función objetivo. Si bien el libro *“Transformer Design Principles with application to Core-Form Power Transformers”* abordó la minimización de costos en transformadores de potencia mediante programación geométrica, ese estudio se enfocó en transformadores de potencia en lugar de los de distribución.

3.4. Técnicas de optimización utilizadas en el presente trabajo

El diseño óptimo de transformadores de distribución representa un problema complejo de optimización no lineal, altamente multimodal y con múltiples restricciones técnicas, económicas y de desempeño. Este tipo de problemas rara vez tiene soluciones analíticas exactas, y los métodos tradicionales (como los algoritmos de programación matemática deterministas) se vuelven ineficientes o imposibles de aplicar debido a la complejidad computacional y la dificultad de modelar exactamente todas las restricciones.

Ante este escenario, el uso de técnicas metaheurísticas se presenta como una alternativa poderosa y flexible. A continuación, se detallan las razones que justifican la elección de las técnicas de optimización Algoritmos Genéticos, Simulated Annealing y NSGA-II para abordar el problema planteado en el presente trabajo, es decir el diseño de transformadores de distribución.

Algoritmo Genético (GA)

- Es eficaz para explorar espacios de búsqueda grandes y complejos.
- Puede escapar fácilmente de óptimos locales, una ventaja clave frente a métodos deterministas.
- Permite manejar variables tanto discretas como continuas, lo cual es útil en el diseño de transformadores.

- GA es especialmente útil en una primera etapa para explorar ampliamente el espacio de soluciones.
- Cuenta con muchos parámetros de ajuste que permiten darle el comportamiento que se desea al algoritmo. Al variar las técnicas de mutación, se puede realizar un ajuste grueso y uno fino.

Simulated Annealing (SA)

- Es eficaz para encontrar soluciones cercanas al óptimo global, incluso en espacios de búsqueda con múltiples óptimos locales.
- Tiene una estructura simple y es fácil de implementar.
- SA se destaca por su capacidad de explotar finamente soluciones en regiones prometedoras, lo cual lo hace ideal para refinar los resultados encontrados por otras técnicas.
- Su enfoque estocástico le permite evitar quedar atrapado en mínimos locales, especialmente útil en problemas altamente no lineales como el diseño de transformadores de distribución.

NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)

- Diseñado específicamente para optimización multiobjetivo, que es esencial en el diseño de transformadores, donde es necesario balancear criterios como costo de materiales y pérdidas.
- Utiliza un enfoque basado en el ranking de soluciones no dominadas y en la diversidad de la población, por lo que se obtiene un conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Esto permite a los diseñadores capacitados elegir entre múltiples alternativas según diferentes compromisos entre los objetivos.

Comparadas con otros enfoques, estas tres metaheurísticas presentan las siguientes ventajas:

- No requieren derivadas ni funciones continuas (lo cual es ideal para problemas con restricciones lógicas o variables discretas).
- Flexibilidad para incorporar múltiples restricciones y objetivos.
- Alta capacidad de escape de óptimos locales.
- Son las técnicas metaheurísticas principales y más avaladas por resultados a lo largo de la historia de la optimización de este tipo.

La técnica de optimización **PSO** se descarta porque si bien maneja bien variables continuas, no está diseñado intrínsecamente para variables discretas. Por otro lado, **Tabu Search** sobresale en escapar óptimos locales pero es menos efectivo en la exploración de extensos espacios de búsqueda y en la identificación de soluciones

de alta calidad. Su mayor potencial reside en actuar como una etapa de ajuste fino, complementando los resultados de otros algoritmos en lugar de operar de forma autónoma como herramienta de solución de un problema de estas características.

4. Proceso de diseño y formulación del problema de optimización

La presente sección tiene como finalidad explicar el funcionamiento de las tres técnicas metaheurísticas que fueron seleccionadas para el diseño de un transformador de distribución. Asimismo, definir las restricciones, parámetros y fórmulas de diseño que se emplearon en cada caso para aprovechar al máximo las virtudes de cada uno de los métodos. En una sección posterior, se comparan los resultados obtenidos.

4.1. Proceso de diseño de un transformador

El proceso tradicional de cálculo y diseño de un transformador se desarrolla siguiendo una serie de etapas lógicas y estructuradas que garantizan que el equipo cumpla con los requisitos y normas de operación. A continuación se detalla el proceso de diseño manual adoptado por los autores que el descripto en *"Cálculo y Construcción de Transformadores"* de Dimenna y Stecca [4]. A partir de este proceso de cálculo manual, se le dará forma a los códigos que automatizan y optimizan el problema.

Definición de parámetros de entrada

Todo comienza con la definición de los datos de entrada. Estos datos incluyen la potencia nominal en kVA, las tensiones primaria y secundaria (V1 y V2), la frecuencia de operación, el tipo de material del núcleo, los materiales estructurales y las normas que se deben cumplir. Estos parámetros son fundamentales, ya que determinan las características básicas que el transformador debe tener y condicionan el resto del diseño.

Cálculo de tensiones y corrientes

A partir de estos datos, se realiza el cálculo de las tensiones y corrientes de los arrollamientos. En esta etapa se determina la relación de transformación, las tensiones en cada devanado y las corrientes nominales, tanto del lado primario como del secundario. Estos cálculos sirven de base para definir el tamaño de los conductores, el diseño de los aislamientos y las dimensiones del transformador.

Cálculo tentativo del núcleo magnético: prediseño

Con los datos de corriente y tensión ya definidos, se avanza en el diseño tentativo del núcleo magnético. Aquí se elige el tipo de acero, se determina la inducción máxima admisible y se calculan las dimensiones del núcleo, como la sección de columna, el número de escalones y el factor de utilización. También se define el diámetro circunscripto, la carga lineal específica, el volumen y la altura de la columna, así como el ancho de la ventana. Si las dimensiones obtenidas no se

ajustan a las restricciones físicas o de eficiencia deseadas, se deben reajustar los cálculos.

Cálculo de las aislaciones y distancias eléctricas

Una vez definido el núcleo de forma preliminar, se diseña el sistema de aislamientos y distancias eléctricas, esenciales para garantizar la seguridad y confiabilidad del equipo. En esta etapa se calculan los aislamientos entre espiras, entre capas, entre bobinas, así como las distancias entre bobinas concéntricas, entre bobinas y la cuba, y entre las diferentes partes activas del transformador.

Cálculo de los arrollamientos

Con el núcleo y los aislamientos definidos, se procede al cálculo detallado de los arrollamientos. Se determina el número de espiras necesarias en cada devanado en función de las tensiones, la densidad de corriente admisible, la sección de los conductores y la disposición final de los bobinados. También se verifica que el diseño de los arrollamientos cumpla con los límites térmicos establecidos y que la distribución de los conductores sea adecuada desde el punto de vista eléctrico y mecánico.

Dimensionamiento final del núcleo

A partir de este punto, se realiza el dimensionamiento final del núcleo, teniendo en cuenta las dimensiones reales de los arrollamientos y de los aislamientos. Esto garantiza que todas las partes del transformador se integren de manera coherente y eficiente dentro del diseño global.

Cálculo de pérdidas eléctricas y rendimiento

Luego se calculan las pérdidas eléctricas y se evalúa el rendimiento del equipo. Se consideran las pérdidas de conducción, que se originan por el efecto Joule en los conductores, y las pérdidas en el hierro, asociadas a los fenómenos de histéresis y corrientes parásitas en el núcleo. Con estos valores se determina el rendimiento global del transformador y se verifica que se encuentre dentro de los márgenes aceptables establecidos por las normas.

Cálculo de calentamiento

El siguiente paso es el cálculo del calentamiento del transformador. Las pérdidas eléctricas se traducen en calor, por lo que se debe calcular la elevación de temperatura del conjunto y dimensionar los elementos de refrigeración, como la cuba, las aletas, los tubos y los radiadores. Estos elementos permiten evacuar el calor y mantener al transformador dentro de los límites térmicos de operación seguros impuestos por norma.

Concluido todo el proceso de cálculo y diseño, se realiza una verificación final para asegurar que el transformador cumpla con todas las normas internacionales, las

restricciones mecánicas, eléctricas y térmicas, y los requisitos de seguridad y eficiencia. Solo en ese momento el diseño se considera completo y apto para su fabricación. La Figura 2.10 en la Sección 2 muestra el diagrama de flujo asociado a este proceso de diseño.

4.2. Parámetros ingresados por el diseñador

Existen ciertos parámetros que deberán ser prefijados e ingresados por el usuario o diseñador antes de iniciar el proceso de optimización. Estos parámetros, esenciales para definir las condiciones del problema, se detallan a continuación:

1. Potencia nominal del transformador en kVA.
2. Tensión nominal primaria en kV
3. Tensión nominal secundaria en kV
4. Frecuencia nominal en Hz

A partir de dichos valores, los códigos harán su trabajo en buscar la solución óptima. Esto es, encontrar los valores para cada una de las variables de diseño que resultan en un mejor valor de la función objetivo.

4.3. Variables de diseño

En los estudios *“Optimization Aspects of Transformer Design”* y *“Cost Effective Design of Conventional Type Distribution Transformers Using Optimization Techniques”* de Narendrakumar y Abu-Sada respectivamente,se utilizan entre 4 y 5 variables de diseño para modelar el problema de manera efectiva [11]. Sin embargo, en este trabajo se optó por incluir un total de 6 variables de diseño. Esta elección se justifica en parte por la intención de proporcionar un mayor grado de flexibilidad en el proceso de optimización, lo que permite explorar un rango más amplio de soluciones posibles. Al incorporar una variable adicional, se logra reducir la necesidad de fijar valores específicos para ciertas características del transformador, lo cual limita las restricciones del modelo y ofrece un espacio de búsqueda más amplio. Las 6 variables seleccionadas fueron las siguientes:

1. Número de vueltas en el arrollamiento de baja tensión.
2. Diámetro de la columna del núcleo de hierro.
3. Coeficiente de utilización del núcleo en $\frac{kVA}{dm^3}$.
4. Dimensiones del conductor en el arrollamiento de baja tensión.
5. Dimensiones del conductor en el arrollamiento de media tensión.
6. Inducción máxima en el núcleo.

Las variables numeradas 1, 2, 3 y 6 son tratadas únicamente cómo valores numéricos, ya sea enteros o flotantes según corresponda. Por otro lado, las variables 4 y 5 son vectores que describen a distintas secciones de pletinas y conductores redondos disponibles comercialmente. [4, 7]

Para las pletinas, se las denomina con vectores de cuatro componentes según se muestra a continuación:

$$(3,\ 25,\ 3,\ 1)$$

- El primer componente es el número de orden asignado a dicha sección de pletina. En este caso, es la tercera sección disponible de la lista.
- El segundo componente es la altura de la pletina en mm. En este caso, $25\ mm$.
- El tercer componente es el ancho (o espesor) de la pletina en mm. En este caso $3\ mm$.
- El cuarto componente toma valor 1 si el material es cobre y 2 si es aluminio. En este caso, se trata de una pletina de cobre.

La Figura 4.1 muestra las dimensiones y características de una pletina cuyo vector asociado es $(3,\ 25,\ 3,\ 1)$:•$(4,\ 25,\ 3,\ 1)$

Figura 4.1 – Dimensiones y características de una pletina cuyo vector asociado es (3, 25, 3, 1).
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, a los conductores redondos se los denomina con vectores de cuatro componentes según se muestra a continuación:

$$(4,\ 2.7,\ 5.7256,\ 1)$$

- El primer componente es el número de orden asignado a dicho conductor. En este caso, es el cuarto disponible de la lista.
- El segundo componente es el diámetro del conductor en mm. En este caso $2,7\ mm$.
- El tercer componente es la sección del conductor en mm^2. En este caso $5,7256\ mm^2$.
- El cuarto componente toma valor 1 si el material es cobre y 2 si es aluminio. En este caso, se trata de un conductor de cobre.

La Figura 4.2 muestra las dimensiones y características de un conductor redondo vector asociado es $(4,\ 2.7,\ 5.7256,\ 1)$:

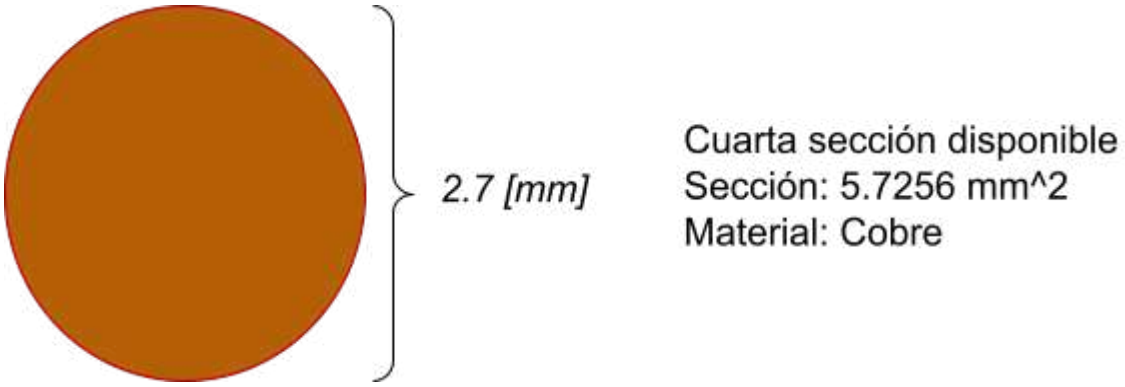


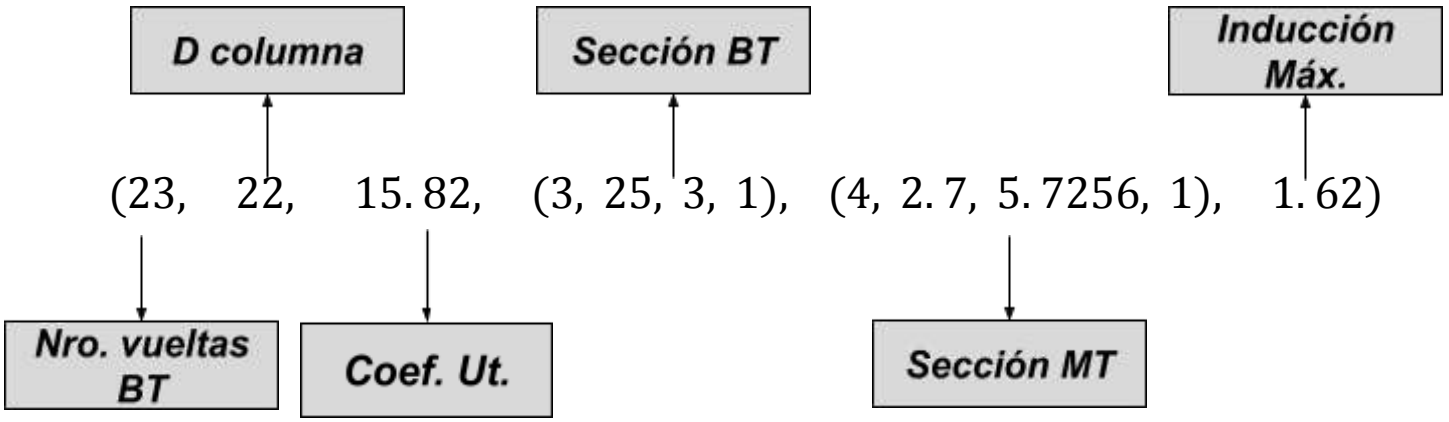
Figura 4.2 – Dimensiones y características de un conductor redondo cuyo vector asociado es (4, 2.7, 5.7256, 1). Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.1 resume y clarifica las características de cada una de las 6 variables de diseño empleadas para el cálculo de transformadores de distribución según este enfoque:

Variable de diseño	***Tipo de variable***	***Unidad***	***Ejemplo***
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$Integer$	$[Vueltas]$	23
$Diámetro\ de\ columna$	$Integer$	$[cm]$	22
$Coeficiente\ de\ utilización$	$Float$	$[\frac{kVA}{dm^3}]$	$15,82$
$Conductor\ BT$	$Vector$	$(-,\ [mm], [mm],\ -)$	$(3,\ 25,\ 3,\ 1)$
$Conductor\ MT$	$Vector$	$(-,\ [mm], [mm^2],\ -)$	$(4,\ 2.7,\ 5.7256,\ 1)$
$Inducción\ Máxima$	$Float$	$[Tesla]$	1.62

Tabla 4.1 - Variables de diseño adoptadas para la optimización del diseño de transformadores de distribución. Fuente: Elaboración propia

De esta manera, los programas de optimización a emplear tratarán a cada combinación de valores como un vector solución. Siguiendo los valores de la Tabla 4.1, los programas evaluarán a la siguiente solución y definirán su aptitud:



De esta manera, los algoritmos de optimización empleados en este estudio evaluarán las posibles soluciones de manera consistente. Es decir, las variables de diseño serán las mismas y no sufrirán modificaciones entre los distintos métodos de optimización utilizados. Esto asegura que las comparaciones entre las técnicas sean justas y que las diferencias en los resultados se deban exclusivamente a las

características inherentes de cada algoritmo, sin interferencias por variaciones en las variables de diseño.

4.4. Restricciones

Las restricciones cumplen un rol fundamental en el diseño de transformadores. Ya sea por cuestiones físicamente imposibles, o por recomendaciones empíricas, existirán rangos de valores que ciertas variables deberán cumplir para ser que la solución analizada sea considerada válida.

En el contexto del cálculo y diseño de transformadores la falta de verificación de las restricciones definidas se penaliza asignando un valor infinito a la función objetivo para dicha solución. De esta forma, por tratarse de un problema de minimización, un valor sumamente alto para la función objetivo lleva al descarte de dicha solución.

4.4.1. Densidad de corriente

Tanto en el primario como en el secundario, la densidad de corriente deberá mantenerse dentro de valores razonables para asegurar valores razonables de volumen de cobre y hierro del transformador. Asimismo, tiene una gran influencia en la sobreelevación de temperatura que sufrirán los arrollamientos.

Respetando los valores recomendados en la bibliografía para transformadores de distribución en aceite, se adopta $1,5\ \frac{A}{mm^2}$ como límite inferior y $3,5\ \frac{A}{mm^2}$ como límite superior para bobinados de cobre y $0,5\ \frac{A}{mm^2}$ como límite inferior y $1,5\ \frac{A}{mm^2}$ como límite superior para bobinados de aluminio [4].

De esta forma, surgen las primeras restricciones si se trata de bobinados de cobre:

$$Restricción\ 1:\ 1,5\ \frac{A}{mm^2} \leq Densidad\ de\ corriente\ BT \leq 3,5\ \frac{A}{mm^2}$$

$$Restricción\ 2:\ 1,5\ \frac{A}{mm^2} \leq Densidad\ de\ corriente\ MT \leq 3,5\ \frac{A}{mm^2}$$

O las siguientes si se trata de arrollamientos de aluminio:

$$Restricción\ 1:\ 0,5\ \frac{A}{mm^2} \leq Densidad\ de\ corriente\ BT \leq 1,5\ \frac{A}{mm^2}$$

$$Restricción\ 2:\ 0,5\ \frac{A}{mm^2} \leq Densidad\ de\ corriente\ MT \leq 1,5\ \frac{A}{mm^2}$$

Es importante destacar que la elección de la densidad de corriente, que en un cálculo manual se selecciona una sola vez, no es un proceso tan sencillo ni intuitivo. Aunque valores cercanos al límite superior del rango pueden generar conductores más pequeños (lo que reduce el costo en conductores), también conllevan un aumento en la sobretemperatura, lo que a su vez incrementa la resistencia y las pérdidas en el devanado. El algoritmo, por lo tanto, tendrá la responsabilidad de

evaluar este balance de manera integral, no de forma aislada, buscando el mejor conjunto de valores para las variables de diseño y actuando en conjunto con ellas para obtener la solución óptima.

4.4.2. Relación entre el número de vueltas en BT y el diámetro de columna del núcleo

El número de vueltas en el arrollamiento de baja tensión, la inducción máxima y el diámetro de las columnas del núcleo son variables de diseño. Como no se calcula una de estas variables en función de las otras (tal como se haría en un cálculo manual), se debe incluir una restricción que asegure que se alcance la inducción y la tensión necesaria por fase.

Se debe cumplir que:

$$Restricción\ 3\colon\ Nro\ vueltas\ BT\ > \frac{E\ [V]\cdot 2250}{f[Hz]\cdot Ind.\ Máx\ [T]\cdot Área\ efectiva\ columna(D_{columna})\ [cm^2]}$$

Donde:

- E es la tensión de simple por fase, $220\ V$ en transformadores de distribución.
- f es la frecuencia nominal en Hz.
- $Área\ efectiva\ columna$ es el área de la columna de diámetro circunscripto igual a $D_{columna}$ que verdaderamente está cubierta por hierro, en cm^2. Este valor es función de ${D_{columna}}^2$.

Especializado al caso de una red argentina en la que la frecuencia nominal es $50\ Hz$ y la tensión simple de fase para la distribución es $220\ V$, la restricción resulta:

$$Restricción\ 3\colon\ Nro\ vueltas\ BT\ > \frac{220\ [V]\cdot 2250}{50[Hz]\cdot Ind.\ Máx\ [T]\cdot Área\ efectiva\ columna(D_{columna})\ [cm^2]}$$

En caso de no cumplir con dicha restricción, el código descarta esa potencial solución asignándole un valor infinito a la función objetivo.

4.4.3. Carga lineal

La cuarta y quinta restricción tienen el propósito de asegurar que tanto el bobinado de baja tensión como el de media tensión no excedan su límite de carga admisible. Esto es, verificar que ninguno de los arrollamientos exceda una sobretemperatura máxima de $\Delta\theta = 55°C$.

Si se grafica la carga lineal admisible en función de la relación $\frac{b}{h}$ del arrollamiento, donde b es el apilado radial del bobinado y h es su altura axial, se obtiene la gráfica de la Figura 4.3:

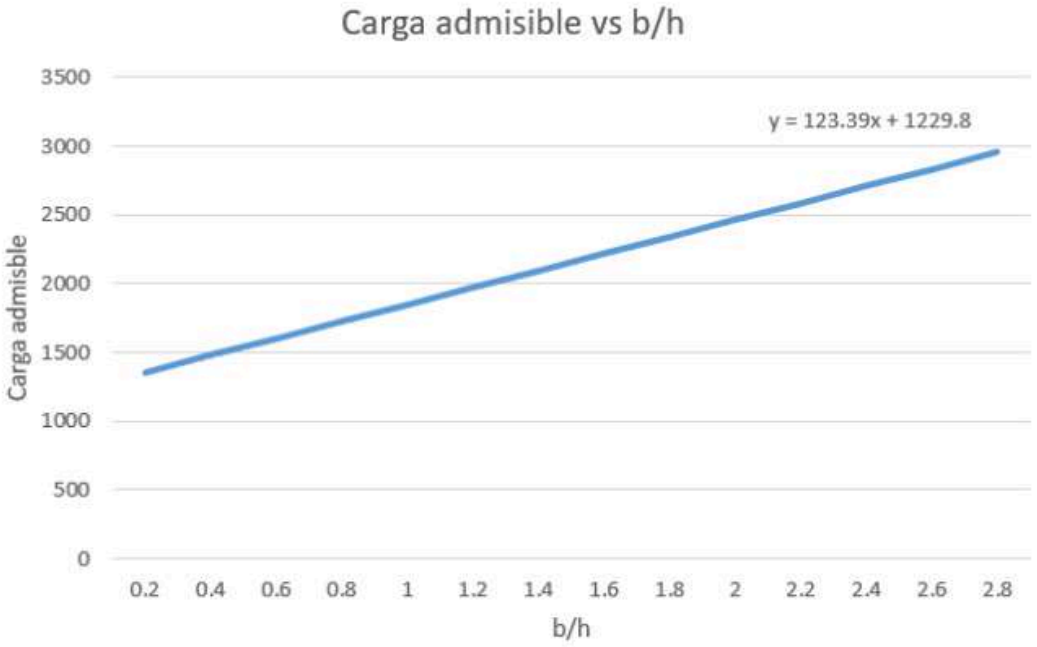


Figura 4.3 – Gráfica que muestra la carga admisible en función de la relación b/h. Donde b es el apilado radial y h la altura axial del bobinado. Fuente [4]

La ecuación de la regresión lineal que representa a los datos indica que la carga admisible de un bobinado responde según la expresión X:

$$Carga\ adm. = \left(\frac{5800}{9{,}6}\right) \cdot \left(\frac{b}{h} - 0{,}6\right) + 1600 \qquad (4.1)$$

De esta manera, la cuarta y quinta restricción trabajan para cerciorarse que las cargas lineales de ambos bobinados no excedan a la admisible:

$$Restricción\ 4\text{:}\ Carga\ lineal\ BT \leq \left(\frac{5800}{9{,}6}\right) \cdot \left(\frac{b_{BT}}{h_{BT}} - 0{,}6\right) + 1600$$

$$Restricción\ 5\text{:}\ Carga\ lineal\ MT \leq \left(\frac{5800}{9{,}6}\right) \cdot \left(\frac{b_{MT}}{h_{MT}} - 0{,}6\right) + 1600$$

4.4.4. Tamaños de la cuba

La **Norma IRAM 2250:2013** para transformadores de distribución define dimensiones máximas para la cuba diseñada en función de la potencia nominal de

la máquina:

Transformador	Potencia S_r (kVA)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Con tanque de expansión	$S_r \leq 315$	1 650	1 100	1 800
	400	1 700	1 100	1 900
	500	1 700	1 100	1 900
	630	1 900	1 200	2 000
	800	2 100	1 400	2 100
	1 000	2 300	1 550	2 300
	1 250	2 350	1 800	2 400
	1 600	2 400	2 200	2 500
	2 000	2 500	2 550	2 600
	2 500	2 800	2 600	2 700
De llenado integral	$S_r \leq 315$	1 650	1 000	1 600
	400	1 650	1 100	1 650
	500	1 650	1 100	1 650
	630	1 700	1 100	1 650
	800	1 800	1 100	1 700
	1 000	1 950	1 300	1 800
	1 250	2 100	1 300	1 900
	1 600	2 200	1 400	1 900
	2 000	2 500	1 600	1 900
	2 500	2 700	1 600	2 000

Tabla 4.2 - Dimensiones máximas para transformadores de distribución según IRAM 2250:2013

Por lo tanto, para un transformador en aceite con una potencia nominal $630\ kVA$, que es la potencia del transformador a ser estudiado, resultan las siguientes restricciones:

$$Restricción\ 6\text{: } Largo\ de\ la\ cuba \leq 1900\ mm$$

$$Restricción\ 7\text{: } Ancho\ de\ la\ cuba \leq 1200\ mm$$

$$Restricción\ 8\text{: } Alto\ de\ la\ cuba \leq 2000\ mm$$

4.4.5. Potencia de pérdidas

La **Norma IRAM 2250:2013** también incluye límites para las potencias de pérdidas en vacío y en cortocircuito. Si bien se debe demostrar el cumplimiento de dichos límites a través de los ensayos correspondientes, se pueden tener en cuenta de antemano en el diseño poniendo límites a las pérdidas en el hierro y en el cobre (o aluminio):

Potencia S_r (kVA)	I_0 (% de I_r)	P_0 (W)	P_K (W)
25	3,5	160	600
63	2,9	270	1 350
100	2,5	350	1 750
160	2,3	500	2 500
200	2,2	600	3 000
250	2,1	700	3 500
315	2,0	850	4 250
400	1,9	1 000	5 000
500	1,9	1 200	6 000
630	1,8	1 450	7 250
800	1,8	1 750	8 750
1 000	1,7	2 000	10 500
1 250	1,6	2 300	13 800
1 600	1,5	2 700	17 000
2 000	1,5	3 000	21 500
2 500	1,4	3 300	24 800
NOTA. I_r = corriente nominal.			

Tabla 4.3 - Dimensiones máximas para transformadores de distribución según IRAM 2250:2013

Para un transformador en aceite con una potencia nominal $630\ kVA$:

$$Restricción\ 9:\ Pérdidas\ en\ el\ hierro\ (P_{Fe} \simeq P_0) \leq 1450\ W$$

$$Restricción\ 10:\ Pérdidas\ de\ conducción\ (P_{Cond} \simeq P_k) \leq 7250\ W$$

4.4.6. Límites a las variables

Todas las técnicas de optimización utilizadas deben, en algún momento, generar una solución viable. Esto puede hacerse proporcionando una solución completa o asignando valores a algunas de las variables de diseño, lo que permite al algoritmo iniciar el proceso de comparación o modificar soluciones existentes para mejorarlas. De esta manera, se introduce una restricción adicional más flexible, que establece rangos de valores para las variables a generar.

4.4.6.1. Diámetro de columna

La fórmula empírica recomendada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Extremadura, España para dimensionar las columnas del núcleo es la que se muestra en la ecuación 4.2.

$$D_{columna} = 4 \cdot \sqrt[4]{S_n} \tag{4.2}$$

Donde:

- $D_{columna}$ es el diámetro de las columnas en cm.
- S_n es la potencia nominal del transformador en kVA.

Dicha expresión surge empíricamente de ensayos para hallar el diámetro de columna que optimiza el costo del transformador y la distribución de sus pérdidas totales entre hierro y de conducción. La definición del diámetro de columna no es un aspecto sencillo o de poca importancia en el diseño de un transformador ya que tiene implicancias sobre todas las otras dimensiones y variables involucradas.

Por ejemplo, si se parte de la conocida expresión de la fuerza electromotriz inducida en un transformador que muestra la ecuación 4.3, un aumento en el diámetro del núcleo implica mayor flujo magnético efectivo y permite disminuir el número de espiras por fase. Esto implica menor impedancia, menores pérdidas variables y mayores corrientes de cortocircuito.

$$E = \frac{N \cdot f \cdot B_{Máx} \cdot k_0 \cdot D_{columna}^{\ 2}}{2250} \tag{4.3}$$

Donde:

- E es la f.e.m eficaz en V.
- N es el número de espiras por fase.
- f es la frecuencia en Hz.
- $B_{Máx}$ es la inducción máxima en el núcleo en T.
- k_0 es el factor de apilado del núcleo.

Asimismo, el aumento en diámetro de columna conduce a columnas de menor largo pero a yugos más largos ya que los arrollamientos tendrán mayor apilado, causando, en el balance neto, un aumento de las pérdidas fijas en el hierro (por haber más kg de hierro).

De esta manera, se define un amplio rango que sea en torno a este valor para generar el valor de esta variable. Esto es, sumando y restando $10\,cm$ al valor calculado:

$$Límite\ 1: \qquad 4 \cdot \sqrt[4]{S_n} - 10\,[cm] \leq D_{columna} \leq 4 \cdot \sqrt[4]{S_n} + 10\,[cm]$$

4.4.6.2. Coeficiente de utilización del núcleo

La carga lineal específica q tiene la siguiente expresión y mide la distribución de la fuerza magnetomotriz a lo largo de la columna:

$$q = \frac{N \cdot I}{L} \tag{4.4}$$

Donde:

- q es la carga lineal en $\frac{A\,v}{cm}$.
- N es la cantidad de vueltas por fase.
- I es la corriente por fase en A.

La carga lineal específica influye sobre la reactancia de cortocircuito del transformador y sobre el calentamiento de los bobinados.

Por otro lado, el coeficiente de utilización del núcleo es la relación entre la potencia por fase del transformador y el volumen de hierro de cada columna. Adoptar un coeficiente de utilización mayor implica exigir más magnéticamente al núcleo, lo que permite disminuir el costo en hierro a expensas de aumentar las pérdidas fijas.

$$C = \frac{Potencia\ aparente\ por\ fase\ [kVA]}{Volumen\ de\ hierro\ de\ una\ columna\ [dm^3]} = \frac{f \cdot q \cdot B_{Máx}}{2250} \tag{4.5}$$

Para transformadores de distribución con potencias entre $100\ kVA$ y $10000\ kVA$, que son en los que se pone foco en el presente trabajo, el coeficiente de utilización recomendado en primera instancia puede tomar valores entre $6\ \frac{kVA}{dm^3}$ y $16\ \frac{kVA}{dm^3}$, tal como muestra la Figura 4.4:

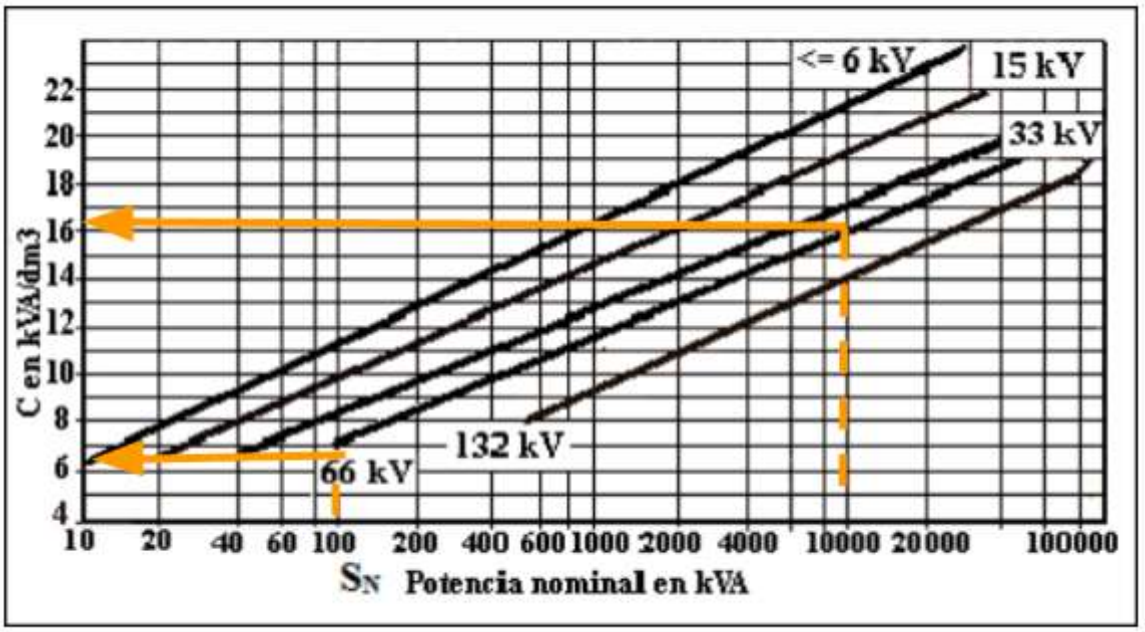


Figura 4.4 – Coeficiente de utilización en función de la potencia nominal del transformador. Fuente [4]

Esta gráfica surge de hacer darle valores a q para distintas potencias y tensiones en transformadores. Dichos valores se obtienen de realizar *ingeniería inversa* sobre transformadores ya diseñados, ya que a priori no se conoce el largo de columna L.

De esta manera, surgen los siguientes límites en la generación de esta variable de diseño:

$$Límite\ 2: \qquad 6\ [\frac{kVA}{dm^3}] \leq Coef.\ Ut. \leq 16\ [\frac{kVA}{dm^3}]$$

4.4.6.3. Inducción máxima

Los valores de inducción máxima a adoptar según la experiencia práctica, para transformadores de distribución con núcleos de acero al silicio de grano orientado, se mantienen dentro del rango establecido entre $1,6\ T$ y $1,7\ T$ ya que de esta forma se asegura trabajar cercano al codo de saturación del núcleo.

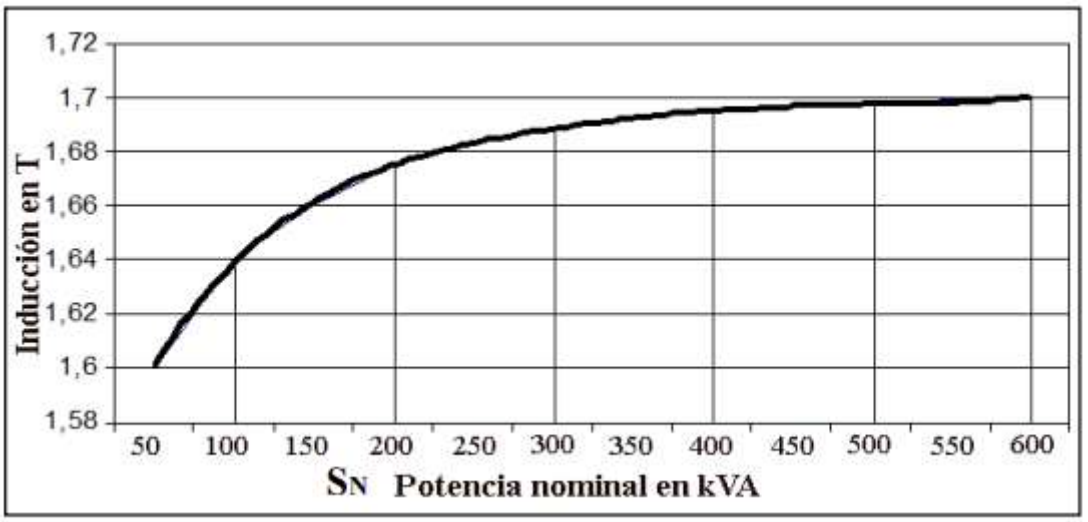


Figura 4.5 – Inducción máxima en función de la potencia nominal del transformador. Fuente [4]

Nuevamente, variar este parámetro de diseño dentro de este rango, por más pequeño que parezca, tiene varias implicancias sobre la máquina. Por ejemplo, si se mantiene fijo el coeficiente de utilización a emplear, una mayor inducción permite disminuir el número de espiras necesarias. Es evidente que dicha decisión tiene implicancias directas sobre la distribución de las pérdidas totales.

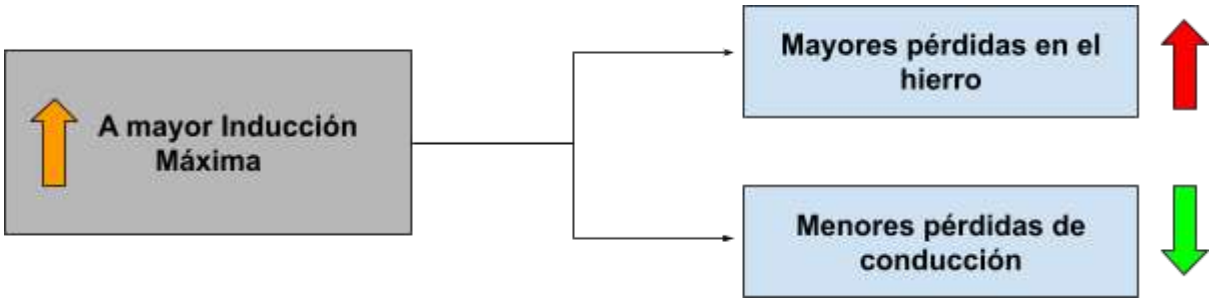


Figura 4.6 –Efecto de la inducción máxima sobre las pérdidas del transformador.
Fuente: Elaboración propia

De esta manera, surgen los siguientes límites en la generación de esta variable de diseño:

$$Límite\ 3: \qquad 1,6\ [T] \leq Inducción\ Máx. \leq 1,7\ [T]$$

4.4.6.4. Secciones de pletinas y conductores para ambos arrollamientos

Los conductores asociados a cada arrollamiento quedan limitados de forma discreta por las opciones disponibles en catálogos de fabricantes

4.4.7. Resumen de restricciones y límites

La Tabla 4.4 resume las restricciones impuestas a los tres códigos de optimización y sus características:

Restricción	Variable restringida	Expresión	Tipo	Naturaleza
1	$Densidad\ de\ corriente\ BT$	$1,5\ \frac{A}{mm^2} \leq Densidad\ de\ corriente\ BT \leq 3,5\ \frac{A}{mm^2}$	$Desigualdad$	$Física/funcional$
2	$Densidad\ de\ corriente\ MT$	$1,5\ \frac{A}{mm^2} \leq Densidad\ de\ corriente\ MT \leq 3,5\ \frac{A}{mm^2}$	$Desigualdad$	$Física/funcional$
3	$Nro.\ vueltas\ BT$	$Nro\ v.\ BT > \frac{220\ [V]\cdot 2250}{50[Hz]\cdot Ind.\ Máx\ [T]\cdot Área\ efectiva\ columna(D_{columna})\ [cm^2]}$	$Desigualdad$	$Física$
4	$Carga\ lineal\ BT$	$Carga\ lineal\ BT \leq \left(\frac{5800}{9,6}\right)\cdot\left(\frac{b_{BT}}{h_{BT}} - 0,6\right) + 1600$	$Desigualdad$	$Física$
5	$Carga\ lineal\ MT$	$Carga\ lineal\ MT \leq \left(\frac{5800}{9,6}\right)\cdot\left(\frac{b_{BT}}{h_{BT}} - 0,6\right) + 1600$	$Desigualdad$	$Física$
6	$Largo\ de\ la\ cuba$	$Largo\ de\ la\ cuba \leq 1900\ mm$	$Desigualdad$	$Funcional$

7	*Ancho de la cuba*	$Ancho\ de\ la\ cuba \leq 1200\ mm$	*Desigualdad*	*Funcional*
8	*Alto de la cuba*	$Ancho\ de\ la\ cuba \leq 2000\ mm$	*Desigualdad*	*Funcional*
9	*Pérdidas en el hierro*	$Pérdidas\ en\ el\ hierro\ (P_{Fe} \simeq P_0) \leq 1450\ W$	*Desigualdad*	*Física/funcional*
10	*Pérdidas de conducción*	$Pérdidas\ de\ conducción\ (P_{Cond} \simeq P_k) \leq 7250\ W$	*Desigualdad*	*Física/funcional*

Tabla 4.4 - Restricciones aplicadas. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que las restricciones no sólo se aplican a variables de diseño sino que también pueden actuar sobre variables de cálculo.

De similar manera, la Tabla 4.5 indica los límites impuestos en la generación inicial para cada una de las variables de diseño:

Límite	Variable limitada		Tipo	Naturaleza
1	$D_{columnas}$	$4 \cdot \sqrt[4]{S_n} - 10\,[cm] \leq D_{columna} \leq 4 \cdot \sqrt[4]{S_n} + 10\,[cm]$	$Desigualdad$	$Funcional$
2	$Coef.\ Ut.$	$6\,[\frac{kVA}{dm^3}] \leq Coef.\ Ut. \leq 16\,[\frac{kVA}{dm^3}]$	$Desigualdad$	$Funcional$
3	$Inducción\ Máx.$	$1,6\,[T] \leq Inducción\ Máx. \leq 1,7\,[T]$	$Desigualdad$	$Física/funcional$
5	$Sección\ BT$	$Catálogos\ fabricantes$	$Discreto$	$Física$
6	$Sección\ MT$	$Catálogos\ fabricantes$	$Discreto$	$Física$

Tabla 4.5 - Límites impuestos en la generación inicial de variables de diseño. Fuente: Elaboración propia

4.5. Técnicas metaheurísticas aplicadas

Como fue mencionado en la Sección 3.4, en el presente trabajo se aplicaron tres técnicas de optimización, dos de ellas de objetivo simple y una multi-objetivo. Cada una de ellas cuenta con un funcionamiento distinto y con distintos parámetros que definen su comportamiento. A continuación se describe cómo se implementó cada técnica en el problema específico del diseño del transformador.

4.5.1. Algoritmo genético (GA)

4.5.1.1. Descripción del GA adoptado

Función objetivo
Dado que se trata de un método de optimización de objetivo simple, y teniendo en cuenta que el objetivo final es optimizar el diseño de transformadores de distribución en términos de cantidad de materiales y pérdidas, es necesario encontrar una forma de combinar ambos aspectos en una única expresión que defina la función objetivo.

Para lograr esto, se monetizan ambos valores, es decir, la cantidad de materiales y las pérdidas, asignándoles un costo en términos monetarios. De esta manera, se convierte todo en una expresión única en unidades de dinero ($), lo que facilita la comparación y optimización del conjunto factores.

$$Costo\ pérdidas\ [\$] = Pérdidas\ Totales\ [kW] \cdot Período\ de\ tiempo\ [h] \cdot Tarifa\ [\frac{\$}{kWh}]$$

$$Costo\ cobre\ [\$] = Peso\ cobre\ [kg] \cdot Precio\ cobre\ [\frac{\$}{kg}]$$
$$Costo\ hierro\ [\$] = Peso\ hierro\ [kg] \cdot Precio\ hierro\ [\frac{\$}{kg}]$$
$$Costo\ aceite\ [\$] = Volumen\ de\ aceite\ [L] \cdot Precio\ aceite\ [\frac{\$}{L}]$$
$$Costo\ aislante\ (prespan)\ [\$] = Volumen\ de\ aislante\ [cm^3] \cdot Precio\ aislante\ [\frac{\$}{cm^3}]$$

$$Costo\ materiales\ [\$] = Costo\ cobre\ [\$] + Costo\ hierro\ [\$] + Costo\ aceite\ [\$] + Costo\ aislante [\$]$$

$$Func.\ Obj. = Costo\ pérdidas\ [\$] + Costo\ materiales\ [\$] \quad (4.6)$$

Es fundamental destacar que los dos términos que conforman la función objetivo están estrechamente relacionados con distintos actores involucrados en la fabricación y adquisición de un transformador. Este análisis debe considerarse al abordar el problema de optimización, ya que permite definir el enfoque adoptado y determinar a qué grupo se busca beneficiar.

Por un lado, si se otorga mayor peso al término de las pérdidas, el enfoque favorece a la empresa o entidad que adquiera el transformador. En este caso, se prioriza la eficiencia energética a lo largo de su vida útil, minimizando costos operativos

asociados a las pérdidas eléctricas. Como consecuencia, el costo de los materiales pasa a un segundo plano, ya que solo impacta en el precio de compra inicial del transformador.

Por otro lado, si se prioriza el costo de los materiales, el análisis se inclina hacia la perspectiva del fabricante, cuyo objetivo principal será minimizar los costos de producción dentro de los límites establecidos por las restricciones. En este escenario, las pérdidas deben mantenerse por debajo de los valores exigidos por la Norma IRAM 2250, aunque no necesariamente constituyen el criterio central de optimización.

Enfoque	Pérdidas	Costo materiales
Desde el que hace uso del transformador	***Mayor relevancia***	***Menor relevancia***
Desde el fabricante	***Menor relevancia***	***Mayor relevancia***

Tabla 4.6 - Intereses de los participantes en el proceso de compra de un transformador. Fuente: Elaboración propia

De esta forma, se introducen los factores α y β que se encargarán de la ponderación de los términos:

$$Func.\ Obj. = \alpha \cdot Costo\ pérdidas\ [\$] + \beta \cdot Costo\ materiales\ [\$] \quad (4.7)$$

El valor que tome la función objetivo no está asociado al precio del transformador en venta, simplemente es un valor en unidades de dinero que permite comparar a diferentes diseños entre sí.

Cabe destacar que la intención de incluir el costo de fabricar físicamente - que es función de las horas-hombre y horas-máquina que lleva construir el transformador - en la función objetivo de optimización no tiene sentido, ya que resulta medianamente constante para transformadores de mismo tipo, independientemente del valor que tomen las variables de diseño. Es decir, que si bien este costo influye sobre el costo total de la máquina, no tiene utilidad para evaluar soluciones equivalentes ya que se vería como una constante sumada a la función objetivo. Por lo tanto, al comparar diferentes soluciones, este valor se anula, no aportando diferenciación útil en la evaluación de alternativas. Este criterio derivó de conversaciones con expertos en el sector, en este caso personal idóneo de la empresa de mantenimiento de transformadores COPETRAF Ltda.

$$Func.\ Obj. = \alpha \cdot Costo\ pérdidas\ [\$] + \beta \cdot Costo\ materiales\ [\$] + Costo\ Fab.\ Cte$$

Asimismo, es un parámetro que varía según la tecnología con la que cuenta el fabricante pero es constante para todos los modelos de igual potencia fabricados en una misma fábrica. Es por este mismo motivo que no se incluye en ningún trabajo previo realizado. [8, 9]

Tamaño de población y cantidad de generaciones

Tras etapas de prueba y error, el algoritmo tuvo su mejor comportamiento con poblaciones pequeñas de 12 individuos y 200 generaciones.

Tamaño de población	12
Cantidad de generaciones	200

La elevada cantidad de generaciones busca asegurar que el algoritmo no se atasque en mínimos locales y encuentre un verdadero mínimo global. Por otro lado, el número reducido de individuos por población resulta conveniente ya que no existen tantas secciones de conductor de BT y MT que cumplan con la restricción de densidad de corriente, por lo que no existe tanta variabilidad de dichos genes.

En el Capítulo 5 se muestra cómo varió el comportamiento del algoritmo y los resultados al variar la cantidad de generaciones analizadas.

Inicialización

Tal como se indicó previamente en la Sección 3.2.1, la población inicial es generada íntegramente en forma aleatoria. Esto es, todos los genes toman un valor aleatorio dentro de los límites ya nombrados (u opciones disponibles para los conductores).

Variable de diseño	***Generación***
Nro. Vueltas BT	*Aleatoria*
Diámetro de columna	*Aleatoria*
Coeficiente de utilización	*Aleatoria*
Conductor BT	*Aleatoria*
Conductor MT	*Aleatoria*
Inducción máxima	*Aleatoria*

Tabla 4.7 - Tipo de generación inicial aplicado a cada variable de diseño.
Fuente: Elaboración propia

Con el fin de mantener en funcionamiento al algoritmo genético, se crea una función que asegure que al menos dos individuos de la población inicial generada verifiquen todas las restricciones. En caso contrario, se descarta a toda la población y se vuelve a generar una nueva población inicial aleatoriamente.

Elitismo

De cada generación, los dos mejores individuos (los que resultaron con menor valor de la función objetivo) se preservan. A partir de ellos, se genera mitad de la población de la generación siguiente a través de mutaciones y la mitad restante a través de cruces.

Mutación

Mitad de la población se genera mutando genes de los últimos elites guardados. Se aplica un sistema de mutación dinámico que respeta la siguiente lógica:

$$Primera\ mitad\ de\ las\ generaciones \longrightarrow Muta\ 2\ genes\ elegido\ en\ forma\ aleatoria$$

$$Segunda\ mitad\ de\ las\ generaciones \longrightarrow Muta\ 1\ gen\ elegido\ en\ forma\ aleatoria$$

Por otro lado, como cada una de las variables de diseño tiene una naturaleza totalmente distinta, las formas en que mutan en caso de que su gen sea elegido para mutar ameritan diferenciación:

Variable de diseño	***Forma de mutación***
$Nro.\ Vueltas\ BT$	Se elige en forma aleatoria si se suma o resta una vuelta al valor original $(\pm\ 1\ vuelta)$
$Diámetro\ de\ columna$	Se toma un valor entre $(-\ 2)$ y 2, respetando una **distribución normal uniforme** y se le suma al valor original. Es decir, que el diámetro varía, como máximo, en $\pm\ 2\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	Se toma un valor entre $(-\ 1)$ y 1, respetando una **distribución normal uniforme** y se le suma al valor original. Es decir, que varía, como máximo, en $\pm\ 1\ [\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	Se toma otra sección disponible en forma aleatoria
$Conductor\ MT$	Se toma otra sección disponible en forma aleatoria
$Inducción\ máxima$	Se toma un valor entre $(-\ 0,05)$ y $0,05$, respetando una **distribución normal uniforme** y se le suma al valor original. La inducción varía, como máximo, en $\pm\ 0,05\ [T]$ entre generación y generación

Tabla 4.8 - Características de la mutación de cada una de las variables de diseño.
Fuente: Elaboración propia

Cruce

Los individuos que surgen de esta forma, lo hacen siguiendo un **cruce uniforme.** Esto quiere decir que cada gen toma un valor igual al de alguno de sus padres, elegido aleatoriamente, respetando que la mitad de ellos sean de un padre y la mitad restante del otro. Dicha técnica se opone al **cruce tradicional** que fue el que se barajó en primera instancia, pero generaba individuos no válidos y con poca coherencia de valores entre genes. Este método contaba con un punto de división y tomaba los primeros 3 genes de un padre y los segundos 3 del otro. La Figura 4.7 esquematiza a los dos métodos de cruce evaluados:

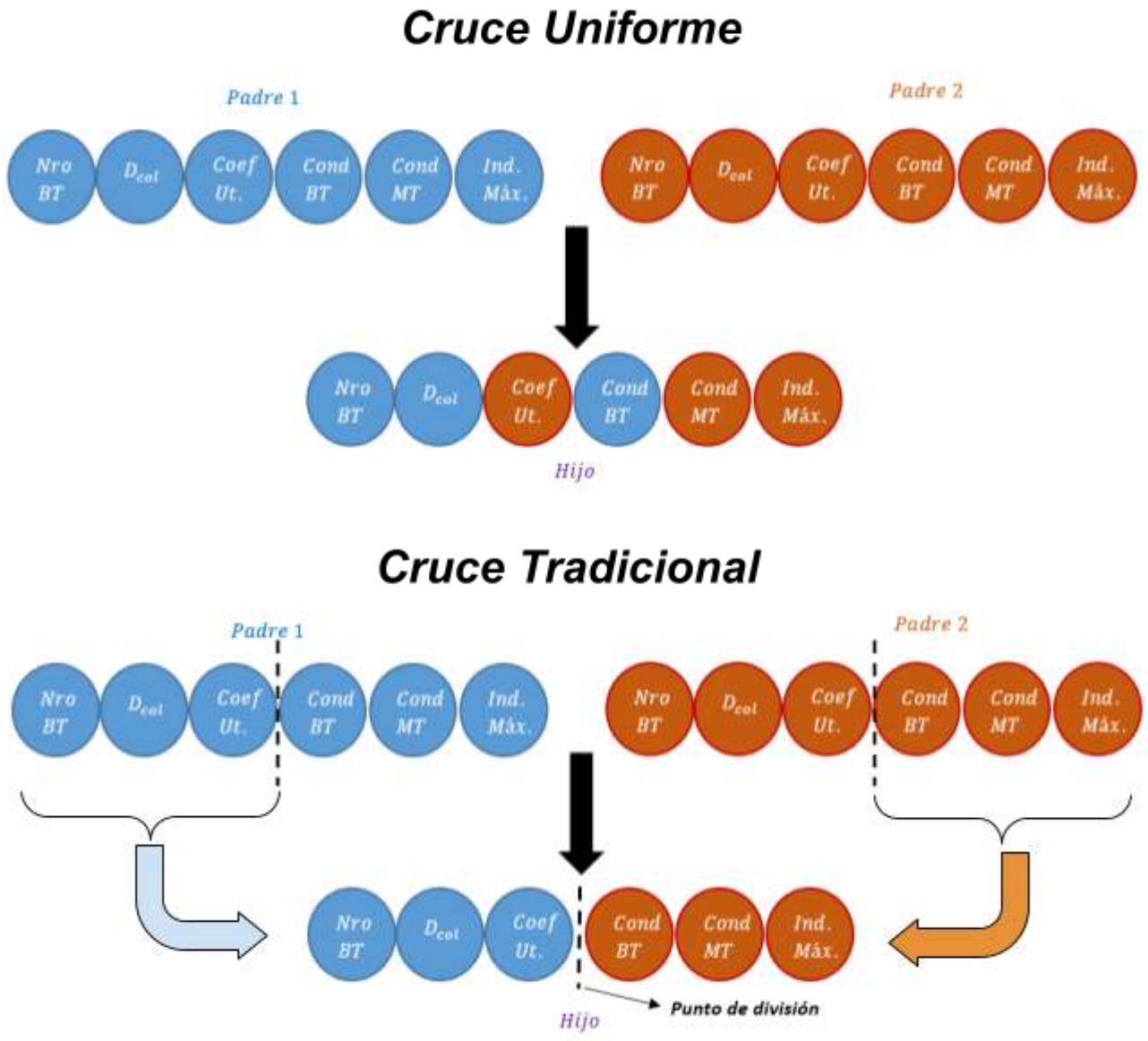


Figura 4.7 – Esquema de cruce uniforme y cruce tradicional en un algoritmo genético.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.7, el hijo obtenido de cruce uniforme es una de las tantas posibilidades ya que cualesquiera tres genes pueden pertenecer al primer padre y cualesquiera tres genes restantes, al otro padre. Por otro lado, definido un punto de división, en el cruce tradicional ya se sabe, de antemano, qué genes pertenecerán a qué padre.

Diagrama de flujo

El diagrama de flujo de la Figura 4.8 explica la lógica que sigue el GA diseñado:

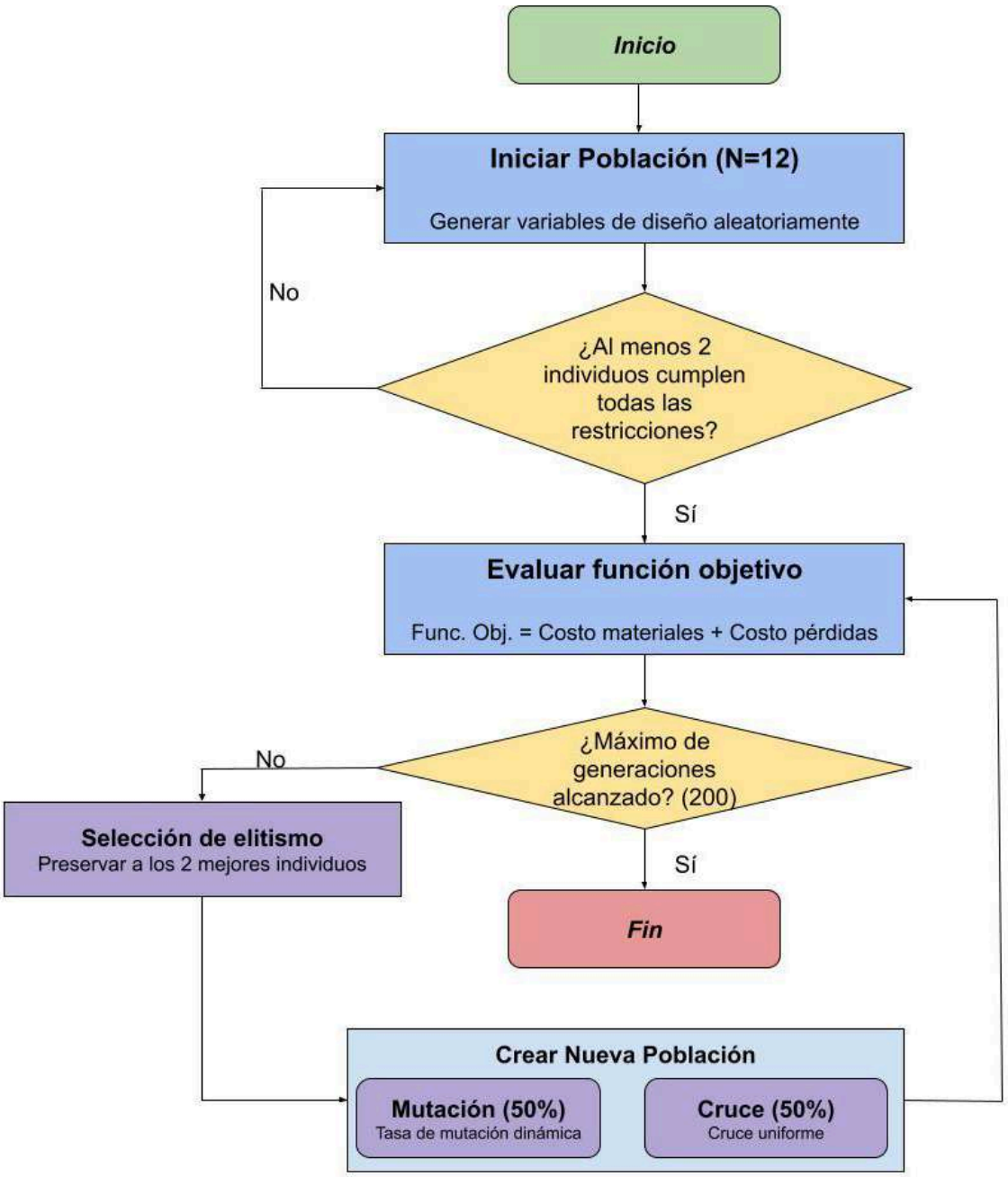


Figura 4.8 – Diagrama de flujo del algoritmo genético. Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Algoritmo NSGA-II

4.5.2.1. Descripción del NSGA-II adoptado

Se mantuvieron constantes tanto los métodos de elitismo, cruce, mutación y generación, como la cantidad de generaciones y el tamaño de la población, respecto al GA de objetivo simple. Su diagrama de flujo global se mantiene con respecto al del GA.

La principal diferencia radica en que, en este caso, no existe una función objetivo específica, por lo que el algoritmo no retorna una única solución óptima. En su lugar, se obtiene un frente de Pareto con múltiples soluciones “igualmente” beneficiosas. Para hacerlo, el NSGA-II debe ordenar y clasificar a las soluciones y lo hace siguiendo los criterios explicados a continuación.

Fast Nondominated Sorting (FNS)

Para organizar y seleccionar las mejores soluciones dentro de la población combinada, el NSGA-II utiliza el método de Fast Nondominated Sorting. Este procedimiento clasifica las soluciones en diferentes niveles o "fronteras" según el principio de dominancia de Pareto. Las soluciones que no son dominadas por ninguna otra conforman la primera frontera, las que son dominadas solo por las de la primera frontera conforman la segunda frontera, y así sucesivamente. Este mecanismo se destaca por su eficiencia y bajo costo computacional, lo que permite ordenar las soluciones de manera rápida y efectiva, incluso en problemas complejos con múltiples objetivos.

Crowding Distance Assignment (CDA)

Una vez que las soluciones son clasificadas por niveles de dominancia, se debe garantizar la diversidad dentro de cada frontera. Para ello, el NSGA-II emplea el mecanismo de Crowding Distance Assignment, un método sin necesidad de parámetros adicionales que mide la densidad de soluciones alrededor de cada individuo. A través del cálculo de una distancia llamada crowding distance, se estima cuán alejada está una solución respecto de las demás. Durante el proceso de selección, se priorizan las soluciones que tienen una mayor crowding distance, es decir, las que se encuentran en zonas menos congestionadas del espacio de búsqueda. De esta forma, se evita la concentración excesiva de soluciones en determinadas regiones y se mantiene una distribución equilibrada y diversa de la población. Es una forma de valorar cuán única es una solución.

Tournament Selection

El proceso de selección de soluciones para la próxima generación se basa en el método conocido como Tournament Selection. En este enfoque, se seleccionan de manera aleatoria pequeños grupos de individuos dentro de la población y, dentro de cada grupo, se elige al mejor según dos criterios: primero, el nivel de dominancia (valor de objetivos) y, si hay empate, el valor de crowding distance. De este modo,

se asegura que las soluciones más competitivas y, al mismo tiempo, las más diversas tengan mayores probabilidades de ser seleccionadas para reproducirse y generar la próxima generación. Este método balancea la presión selectiva hacia las mejores soluciones con la necesidad de mantener la diversidad en la población.

La Figura 4.9 esquematiza cómo el algoritmo selecciona a las soluciones según su dominancia y luego según cuán aisladas están del resto.

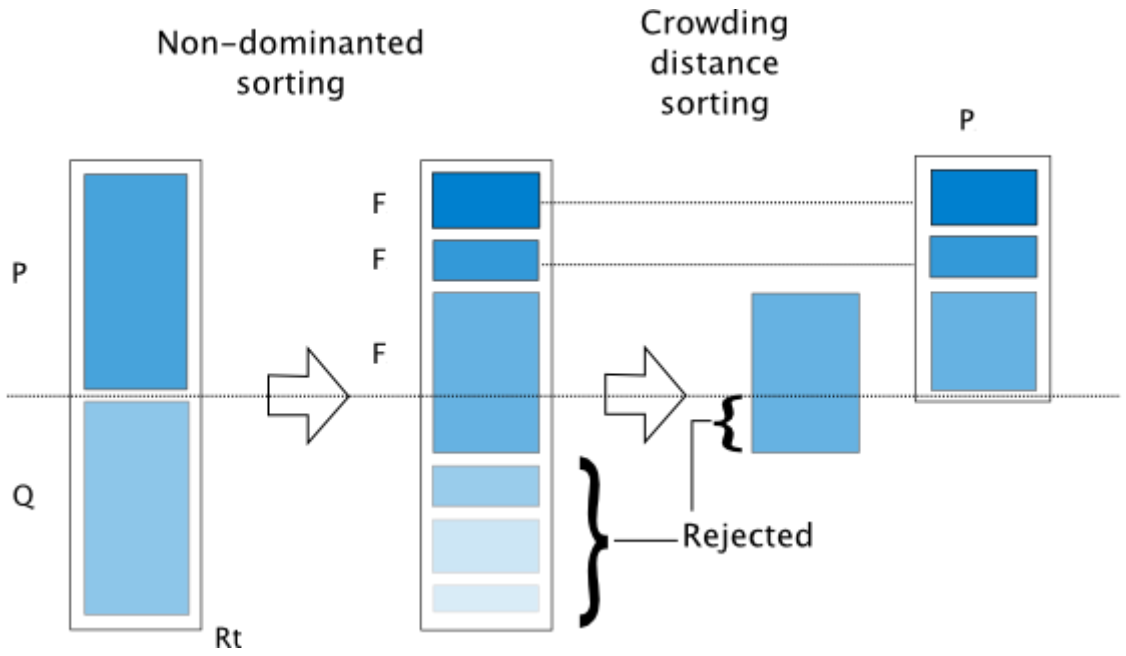


Figura 4.9 – Diagrama que muestra forma de selección de las soluciones, primero por dominancia (FNS) y luego por cuán aisladas están respecto al resto (CDA). Fuente: Deb, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm, 6(2):182–197, 2002

4.5.3. Algoritmo de recocido simulado (SA)

4.5.3.1. Descripción del SA adoptado

Función objetivo

Nuevamente, por tratarse de un algoritmo de objetivo simple, toma gran relevancia el concepto de función objetivo. Con la finalidad de poder comparar resultados, se mantiene la misma función objetivo que en el algoritmo genético (GA):

$$Función\ Obj. = \alpha \cdot Costo\ pérdidas\ [\$] + \beta \cdot Costo\ materiales\ [\$]$$

Generación

La generación inicial de soluciones se hace de forma idéntica al GA: de forma aleatoria, respetando las restricciones y los límites impuestos.

Mutación

Si bien en el recocido simulado (SA) no existen los conceptos de cruce, elitismo y generaciones, sí se debe definir la forma en la que se van mutando las soluciones para ampliar el campo de exploración del algoritmo. La lógica a emplear será la misma que en el GA, mutando 2 variables de diseño la primera mitad de iteraciones y 1 sóla variable de diseño en la segunda mitad.

Cada variable de diseño será variada siguiendo las mismas bases que las ya expresadas en la Tabla 4.8 de la Sección 4.4.1.1.

Parámetros adoptados

La Tabla 4.9 muestra los valores adoptados en el algoritmo SA diseñado:

Parámetro	Valor adoptado
$Temperatura\ máxima$ (T_{max})	$1000\ °C$
$Temperatura\ mínima$ $(T_{mín})$	$10^{-1}\ °C$
$Factor\ de\ enfriamiento$ (γ)	$0,99$
$Iteraciones$ (N_{it})	400

Tabla 4.9 - Valores adoptados para los parámetros del algoritmo SA.
Fuente: Elaboración propia

Diagrama de flujo

La Figura 4.10 muestra un diagrama de flujo que describe la lógica que sigue el algoritmo de Recocido Simulado implementado:

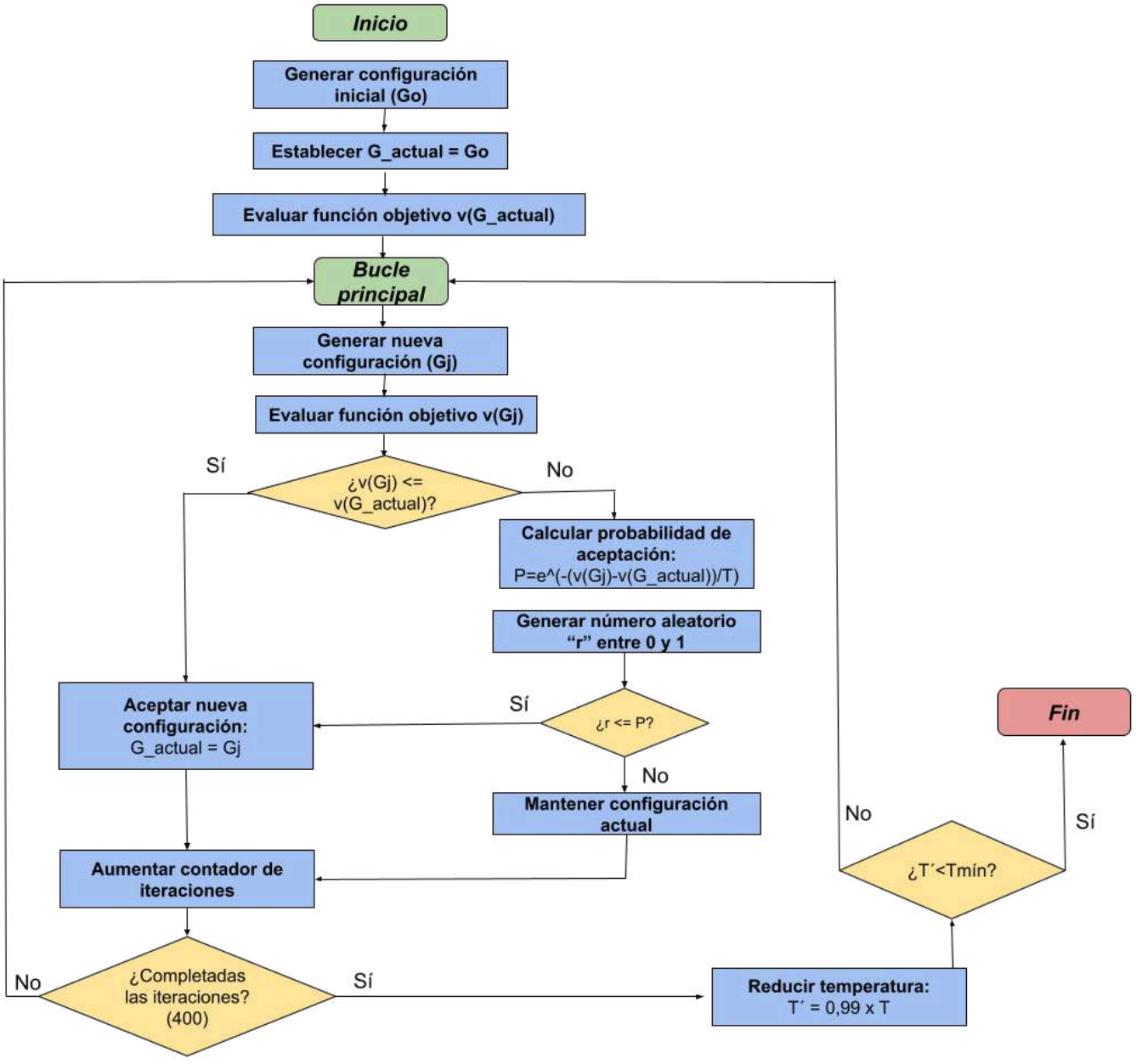


Figura 4.10 Diagrama de flujo del NSGA-II. Fuente: Elaboración propia

4.5.4. Fuerza bruta

Este cuarto y último método de optimización es un enfoque simple pero costoso en términos de tiempo computacional, en el que se exploran todas las posibles soluciones a un problema para encontrar la mejor.

El principio de la fuerza bruta es exhaustivo: evalúa todas las combinaciones posibles de manera sistemática, sin hacer suposiciones sobre la solución, hasta encontrar la óptima. Este tipo de técnica es generalmente utilizada cuando el espacio de soluciones es pequeño.

En el presente trabajo, no se utilizó el algoritmo enumerativo para resolver el problema principal del diseño del transformador, dado que el costo computacional que implicaría implementar dicho algoritmo para resolver un problema de esta complejidad (gran cantidad de variables y combinaciones posibles) sería excesivo. Pero si se aplicó para abordar un subproblema específico del diseño: **la optimización del conformado de las columnas del transformador**. Como fue mencionado anteriormente, para problemas con un espacio de soluciones acotado, este algoritmo garantiza la solución óptima.

4.5.4.1. Aplicación a un subproblema del diseño de transformadores

En los tres códigos, se incluye una función que, una vez definida la cantidad de escalones a utilizar, determina la configuración de la sección transversal de la columna del transformador. Su objetivo es, a partir de los tamaños de chapas de acero al silicio disponibles comercialmente o cortadas en el taller de manufactura con incrementos previamente establecidos, definir la configuración que maximice la sección efectiva.

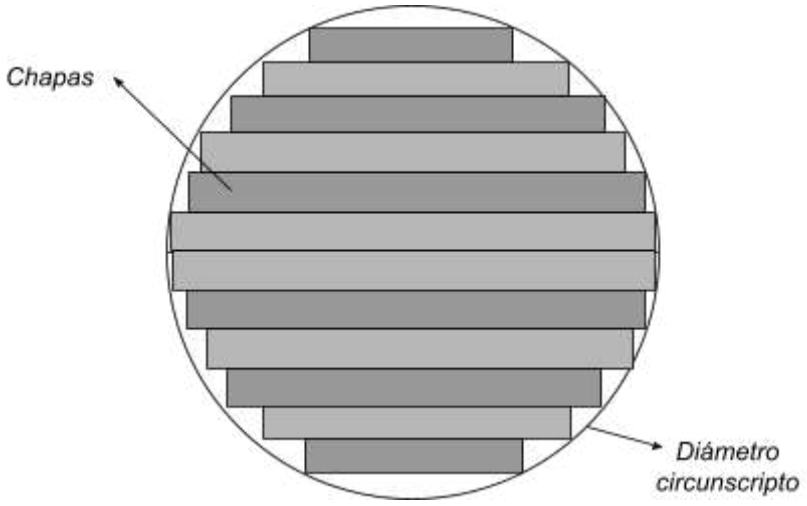


Figura 4.11 – Vista esquemática de la sección de la columna del núcleo.
Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Figura 4.12 permite esquematizar el problema y dejar en claro cuáles son las variables involucradas:

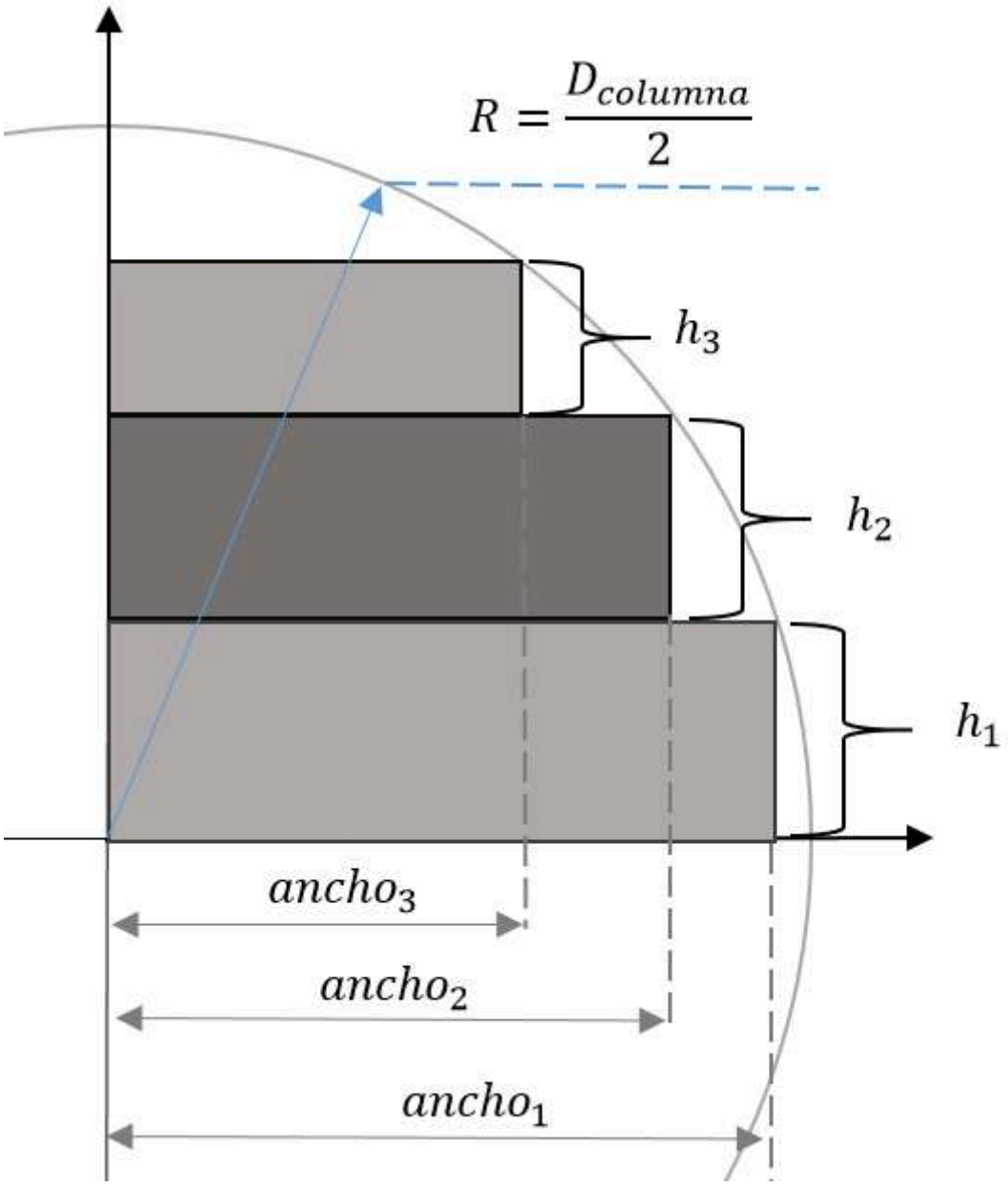


Figura 4.12 – Esquema geométrico del núcleo escalonado y variables de diseño involucradas.
Fuente: Elaboración propia

El objetivo de esta subfunción es maximizar el área efectiva de las columnas del núcleo. La expresión asociada es:

$$Área\ efectiva\ =\ 4\ \cdot\ (h_1 \cdot ancho_1\ +\ h_2 \cdot ancho_2\ +\ h_3 \cdot ancho_3\ +\ \ldots\ +\ h_n \cdot ancho_n) \qquad (4.8)$$

Si se analiza un cuarto de la circunferencia, se pueden expresar las alturas de cada escalón en función del radio $R = \frac{D_{columna}}{2}$.

La Tabla 4.10 muestra las expresiones de las alturas de cada escalón:

Escalón	Expresión de la altura *h*
$Escalón\ 1$	$h_1 = \sqrt{(R^2 - (ancho_1)^2)}$
$Escalón\ 2$	$h_2 = \sqrt{(R^2 - (ancho_2)^2)} - h_1$
$Escalón\ 3$	$h_3 = \sqrt{(R^2 - (ancho_3)^2)} - (h_1 + h_2)$
$Escalón\ n$	$h_n = \sqrt{(R^2 - (ancho_n)^2)} - (h_1 + h_2 + h_3 + \ldots + h_{n-1})$

Tabla 4.10 - Expresiones de las alturas de cada escalón en el conformado del núcleo. Fuente: Elaboración propia

La tarea de la función será definir los anchos de cada escalón de forma que el área efectiva total sea maximizada. Para hacerlo, debe seleccionar dicho anchos de valores disponibles comercialmente o en el taller:

$$\{ancho_1,\ ancho_2,\ ancho_3,\ \ldots,\ ancho_n\} \in \{Anchos\ disponibles\}$$

De esta forma la función recibirá como entrada a dos variables y devolverá otras dos (aunque podría devolver sólo las alturas y hacer el cálculo de área efectiva final fuera de la función):

	Variables	Tipo de variable
$Entrada$	$D_{columna}\ y\ Cantidad\ de\ escalones$	$integer,\ ambas$
$Salida$	$Alturas\ y\ Área\ efectiva$	$vector\ (Alturas)$ $float\ (Área\ efectiva)$

Tabla 4.11 - Variables de entrada y salida a la función que calcula el área efectiva de cada columna del transformador. Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las entradas, la cantidad de escalones se suele prefijar en 4 para transformadores de distribución. De esta forma, la función hará su cálculo en cada iteración para los distintos valores de $D_{columna}$ que reciba.

4.5.4.2. Diferencia con los otros métodos de optimización aplicados

Este método de optimización se diferencia de los otros porque realiza un análisis exhaustivo de todas las posibles opciones, evaluando cada una de ellas de manera sistemática. A diferencia de otros métodos que pueden emplear aproximaciones o suposiciones para reducir el espacio de búsqueda, este enfoque garantiza que se considere cada alternativa, asegurando que la solución seleccionada sea realmente la mejor. Al no depender de heurísticas o restricciones previas, tiene la ventaja de encontrar la configuración óptima sin pasar por alto ninguna posibilidad viable.

Si bien esta técnica asegura que el resultado obtenido corresponde al óptimo global, en situaciones donde el usuario requiere evaluar un gran número de variables, el tiempo computacional requerido puede ser excesivo.

4.5.5. Definición de precios y valores

A partir de la consulta a expertos de ***COPETRAF Transformadores Mar del Plata Ltda***, se logró definir la mejor forma de valorizar los materiales y cuantificar los resultados. Se pasaron los precios a dólares al tipo de cambio oficial del mes de marzo del año 2025 [10] (1 USD = 1078 ARS), para que resulten menos dependientes de la inflación.

Material	***Precio (en U$D)***	***Fuente***
Cobre	$10,16\ [\frac{\$}{kg}]$	***COPETRAF - Casa del Resorte y Materiales Hugo Conca***
Aluminio	$2,7\ [\frac{\$}{kg}]$	***COPETRAF - Casa del Resorte y Materiales Hugo Conca***
Acero al silicio (Fe-Si) grano orientado	$2,1\ [\frac{\$}{kg}]$	***COPETRAF - Chillemi***
Aceite	$8\ [\frac{\$}{L}]$	***Interlub***
Prespan	$0,022\ [\frac{\$}{g}]$	***COPETRAF - Cazalá***
Energía Pérdidas	$0,0683\ [\frac{\$}{kWh}]$	***EDEA (T3)***

Tabla 4.12 Valor monetario asignado a cada material y el valor de las pérdidas eléctricas. Se provee la fuente consultada para definir dichos valores.

4.5.6. Parámetros de entrada del caso de estudio

El algoritmo de diseño implementado, es aplicable a transformadores de distribución de cualquier potencia. Sin embargo, se adopta como caso de estudio el transformador cuyas características se muestran en la tabla 4.13. El motivo de esta elección es porque el diseño de este modelo de transformador se encuentra desarrollado en el libro *"Cálculo y construcción de Transformadores"* [4], permitiendo validar los resultados obtenidos.

Potencia nominal	$630\ [kVA]$
Tipo	$Trifásico$
Tensión primaria	$13,2\ [kV]$
Tensión secundaria	$0,4/0,38\ [kV]$
Regulación	$\pm\ 5\%$
Frecuencia	$5\ [Hz]$
Conexión	$D - Y$
Aletas	$Onduladas$
Aislación	$Aceite$
Refrigeración	$ONAN$

Tabla 4.13 Parámetros de entrada para los transformadores a diseñar.
Fuente: Elaboración propia

5. Análisis de resultados

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos tras aplicar cada una de las técnicas metaheurísticas elegidas. Asimismo, se comparan las soluciones halladas y se evalúa el efecto que tiene la variación de parámetros sobre los resultados.

5.1. Algoritmo genético (GA)

En primera instancia, se adoptan los siguientes valores para los coeficientes de ponderación de la función objetivo. Recordando que dichos factores tienen la función de determinar qué tanta importancia se le da al costo de las pérdidas en comparación al costo de los materiales.

α	β
1	30

Estos valores de los coeficientes de ponderación llevan a que, en la suma, ambos términos tomen un valor similar. De esta manera, se les da una importancia parecida a las pérdidas y al costo de materiales. Con esta ponderación similar de los términos, el análisis se posiciona a medio camino, entendiendo los intereses del fabricante y del usuario como entidades separadas y permitiendo un punto inicial de análisis. Se debe recordar que las pérdidas a lo largo de toda la vida útil del transformador (50 años) llevan a un gasto tarifario muy superior al costo de materiales, por eso la necesidad de adoptar un valor de β tan elevado.

Caso 1:

Población	Generaciones	Mutación
12	200	$2\ genes$

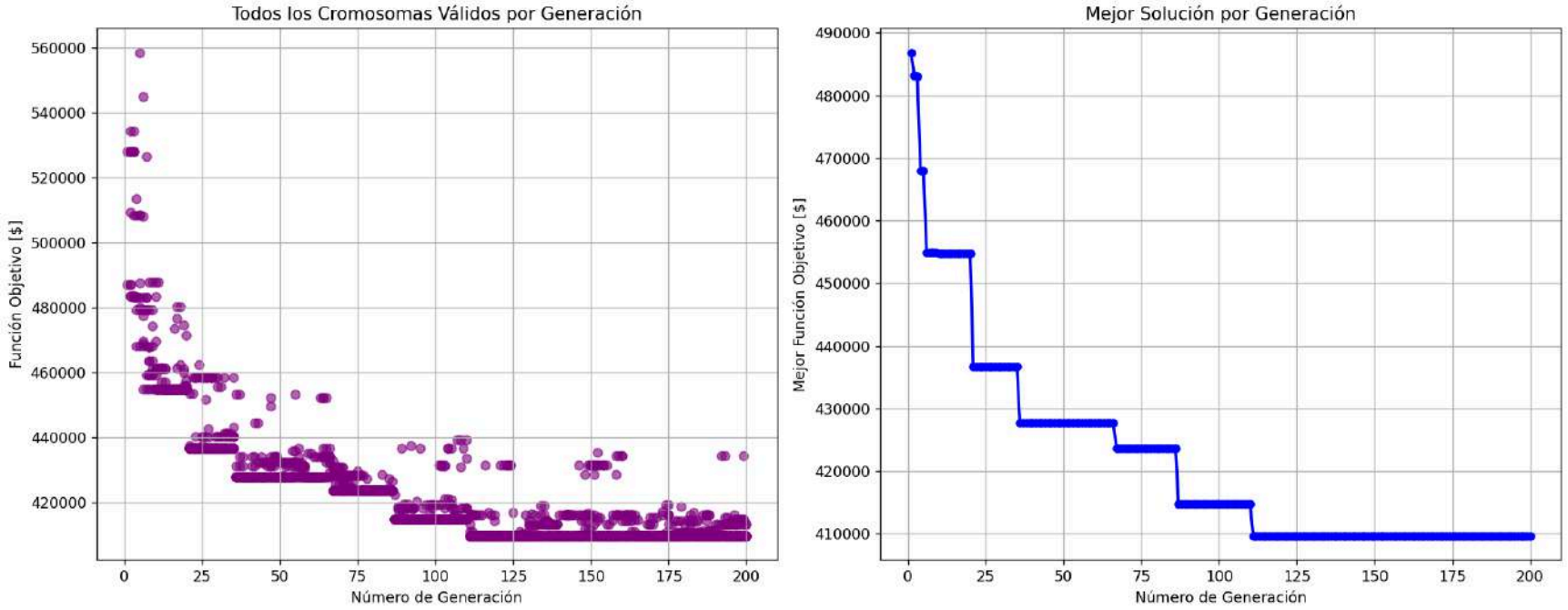


Figura 5.1 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 1. Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
Generación en la que fue hallada	111
Valor de la función objetivo	409703 [$]
Nro. Vueltas BT	18 $[vueltas]$
Diámetro de columna	20 $[cm]$
Coeficiente de utilización	16 $[\frac{kVA}{dm^3}]$
Conductor BT	*Pletina* (Al) 25 x 12 $[mm]$ (3 *en paralelo*)
Conductor MT	*Redondo* (Cu) 2, 5 $[mm]$
Inducción máxima	1, 7 $[T]$
Volumen de aceite	473 $[L]$
Volumen de hierro	99, 96 $[dm^3]$
Aletas	42 *aletas onduladas*$/Supf = 17\ [m^2]$
Máxima sobretemperatura aceite	54, 2 $[°C]$
Costo materiales	7738 [$]
Pérdidas totales	5854 $[W]$

Tabla 5.1 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 1.
Fuente: Elaboración propia

Caso 2:

Población	Generaciones	Mutación
12	200	$1\ gen$

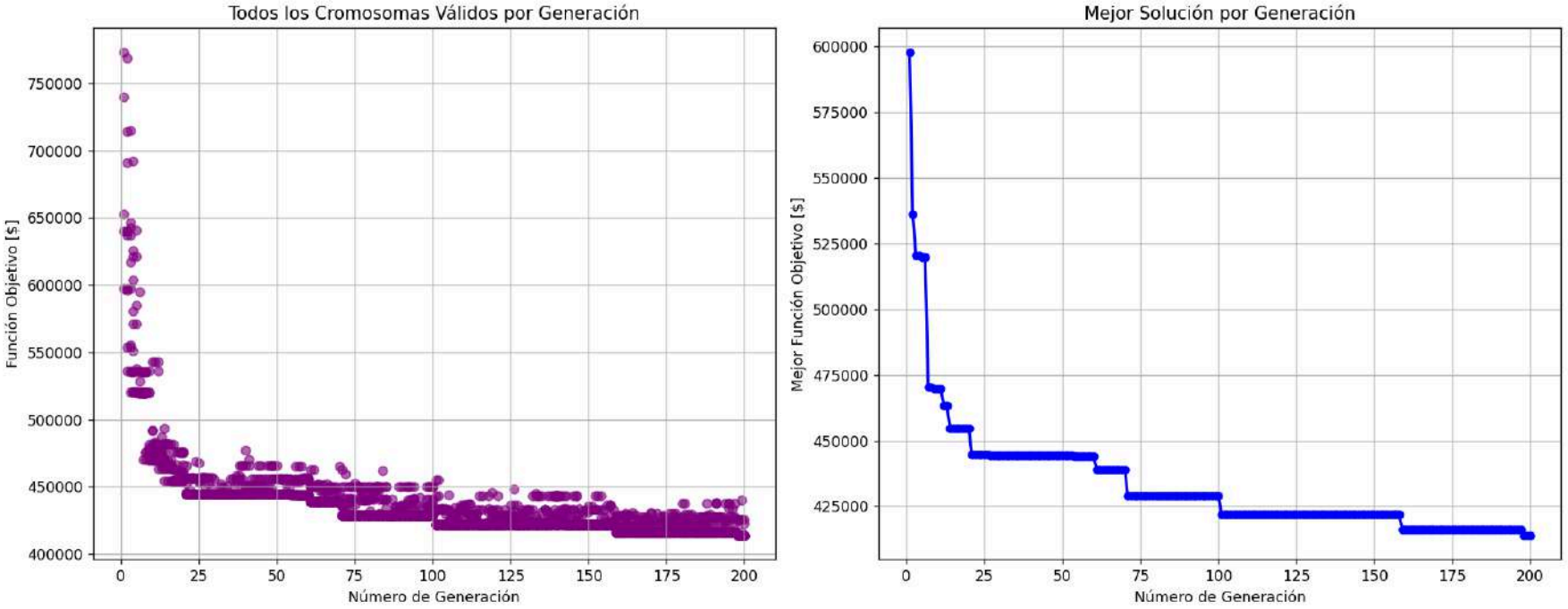


Figura 5.2 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 2. Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
Generación en la que fue hallada	198
Valor de la función objetivo	414048 [$]
Nro. Vueltas BT	20 [*vueltas*]
Diámetro de columna	20 [*cm*]
Coeficiente de utilización	12, 13 $[\frac{kVA}{dm^3}]$
Conductor BT	*Pletina* (*Al*) 30 *x* 6 [*mm*] (4 *en paralelo*)
Conductor MT	*Redondo* (*Al*) 5 [*mm*]
Inducción máxima	1, 6 [*T*]
Volumen de aceite	671 [*L*]
Volumen de hierro	130, 6 $[dm^3]$
Aletas	27 *aletas onduladas*/*Supf* = 12, 3 $[m^2]$
Máxima sobretemperatura aceite	54, 8 [°*C*]
Costo materiales	9066 [$]
Pérdidas totales	4485 [*W*]

Tabla 5.2 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 2.
Fuente: Elaboración propia

Caso 3:

Población	Generaciones	Mutación
12	100	Primera mitad: $2\ genes$ Segunda mitad: $1\ gen$

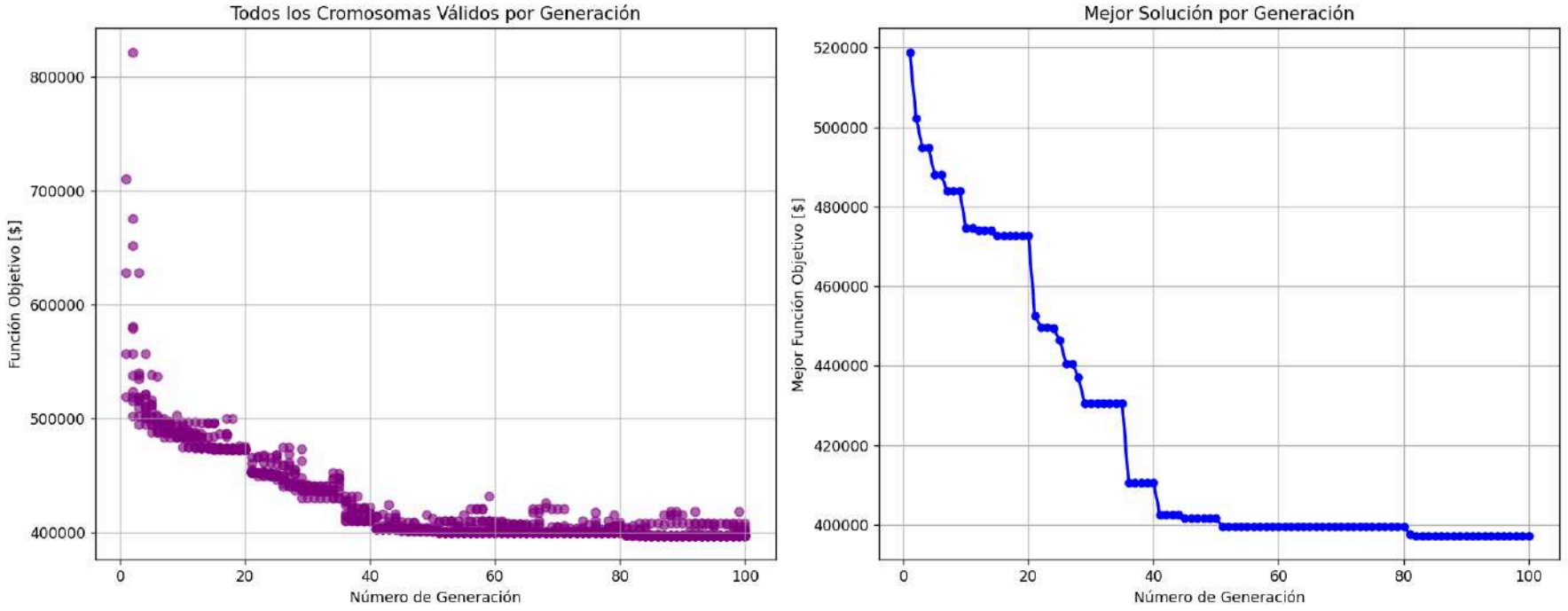


Figura 5.3 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 3. Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
Generación en la que fue hallada	100
Valor de la función objetivo	397296 [$]
Nro. Vueltas BT	17 [*vueltas*]
Diámetro de columna	21 [*cm*]
Coeficiente de utilización	14 $[\frac{kVA}{dm^3}]$
Conductor BT	*Pletina* (*Al*) 25 *x* 12 [*mm*] (4 *en paralelo*)
Conductor MT	*Redondo* (*Cu*) 2, 8 [*mm*]
Inducción máxima	1, 6 [*T*]
Volumen de aceite	435 [*L*]
Volumen de hierro	114, 7 $[dm^3]$
Aletas	35 *aletas onduladas*/*Supf* = 14, 4 $[m^2]$
Máxima sobretemperatura aceite	54 [°*C*]
Costo materiales	8415 [$]
Pérdidas totales	4967 [*W*]

Tabla 5.3 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 3.
Fuente: Elaboración propia

Caso 4:

Población	Generaciones	Mutación
12	200	Primera mitad: $2\ genes$ Segunda mitad: $1\ gen$

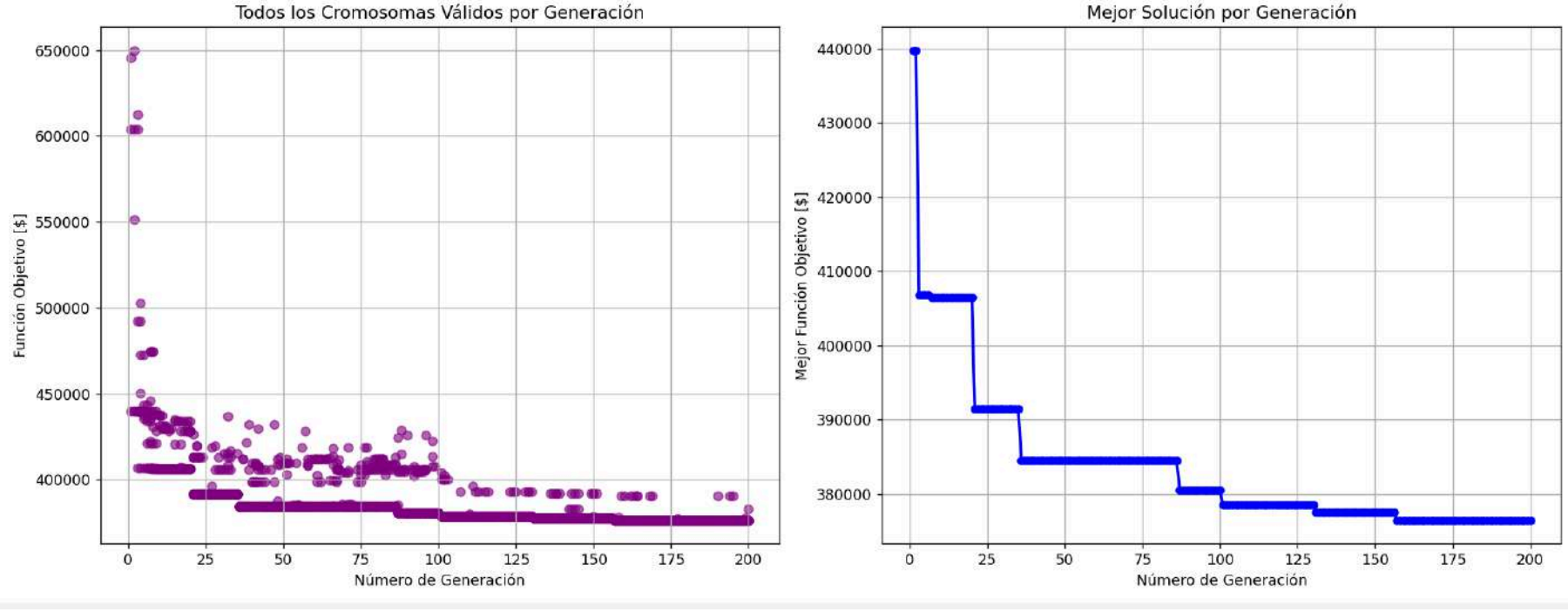


Figura 5.4 – Evolución de la función objetivo por generación: población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Caso 4. Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
Generación en la que fue hallada	157
Valor de la función objetivo	376490 [$]
Nro. Vueltas BT	18 [*vueltas*]
Diámetro de columna	21 [*cm*]
Coeficiente de utilización	13, 6 $[\frac{kVA}{dm^3}]$
Conductor BT	*Pletina* (*Al*) 30 *x* 6 [*mm*] (4 *en paralelo*)
Conductor MT	*Redondo* (*Al*) 4, 5 [*mm*]
Inducción máxima	1, 6 [*T*]
Volumen de aceite	570 [*L*]
Volumen de hierro	126, 6 $[dm^3]$
Aletas	31 *aletas onduladas*/*Supf* = 13, 4 $[m^2]$
Máxima sobretemperatura aceite	53, 7 [°*C*]
Costo materiales	8365 [$]
Pérdidas totales	4603 [*W*]

Tabla 5.4 - Resultados de la simulación del GA con los parámetros del caso 4. Fuente: Elaboración propia

El gráfico de la Figura 5.5 muestra los mejores valores de la función objetivo a lo largo de las generaciones.

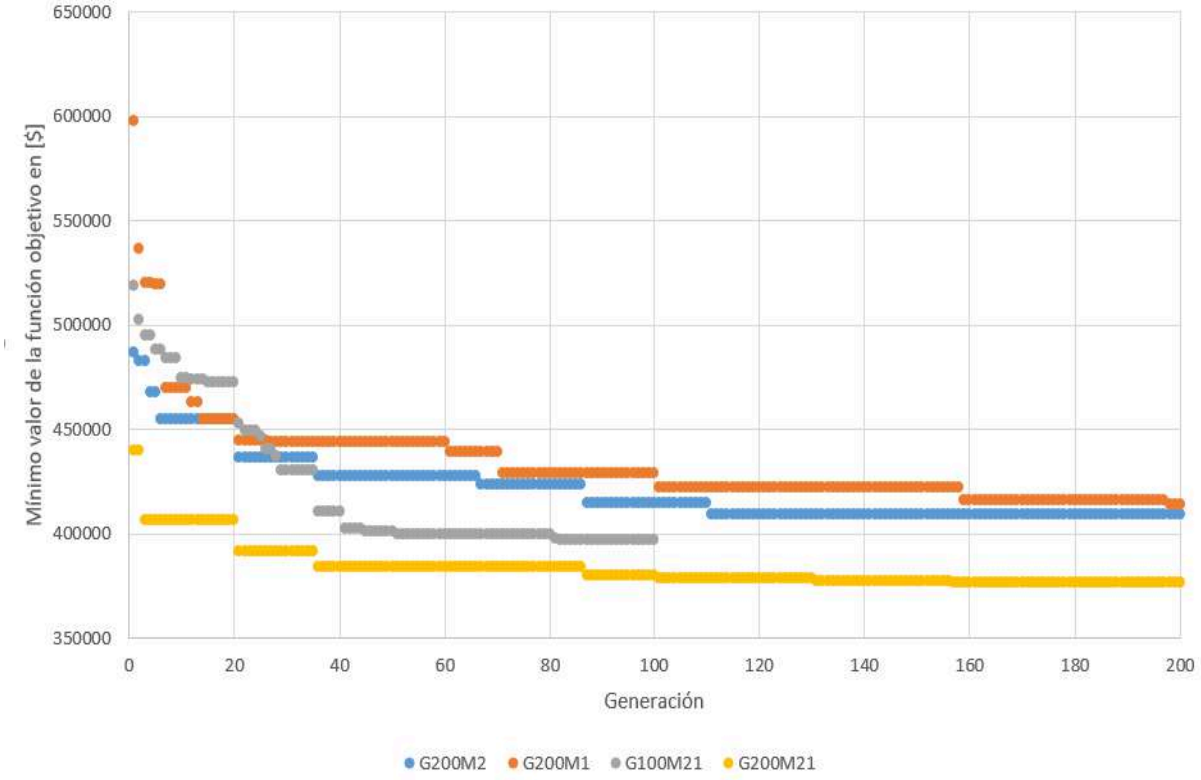


Figura 5.5 – Comparativa de resultados GA-1 para distinta cantidad de generaciones y tipo de mutación. Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5.5 complementa al gráfico y analiza el comportamiento de cada uno casos corridos en el código:

Nombre en leyenda	Color	Descripción	Comportamiento y efectividad
G200M2	Azul	200 generaciones Muta 2 genes	Saltos grandes debido a que muta 2 genes en todas las generaciones. No realiza ajuste fino, se estanca en peores soluciones.
G200M1	Naranja	200 generaciones Muta 1 gen	Saltos muy pequeños ya que muta de a 1 gen en todas las generaciones. Resulta muy dependiente de la población inicial ya que no logra alejarse mucho de su valor de Func. Obj. En la generación 198 sigue encontrando mejores soluciones (necesitaría más generaciones para continuar mejorando)
G100M21	Gris	100 generaciones Muta 2 genes la primera mitad y 1 solo gen la segunda	Muy efectivo, saltos grandes en las primeras 50 generaciones y ajuste fino en las segunda mitad. En la generación 100 halla su mejor solución, lo que indica que podría seguir mejorando.
G200M21	Amarillo	200 generaciones Muta 2 genes la primera mitad y 1 solo gen en la segunda	Método más efectivo de todos. Realiza un ajuste grueso (mutando 2 genes) y luego uno fino (mutando 1 gen). Alcanza su mínimo en la generación 157, lo que asegura que se trate de un mínimo global y no local (al probar agregar generaciones, no encuentra una mejor solución).

Tabla 5.5 - Comparación del comportamiento del GA en cada uno de los 4 casos.
Fuente: Elaboración propia

Para los valores de α y β empleados, el mejor transformador es el hallado a través del último método y sus características se detallan en la Tabla 5.6:

$Nro.\ Vueltas\ BT$	$18\ [vueltas]$
$Nro.\ Vueltas\ MT$	$7\ galletas\ con\ 172\ [v]\ cada\ una$ $Bobinadas\ en\ 10\ capas$
$Diámetro\ de\ columna$	$21\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$13,64\ [\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Al)\ 30\ x\ 6\ [mm]\ (4\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (Al)\ 4,5\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,6\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$570\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$126,6\ [dm^3]$
$Volumen\ de\ prespan$	$28,82\ [dm^3]$
$Largo\ cuba$	$140\ [cm]$
$Ancho\ cuba$	$60\ [cm]$
$Alto\ cuba$	$100\ [cm]$
$Aletas$	$31\ aletas\ onduladas/Supf\ =\ 13,4\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$53,7\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$8365\ [\$]$
$Pérdidas\ cobre$	$3355\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1249\ [W]$

Tabla 5.6 - Datos del mejor transformador obtenido a través del GA.
Fuente: Elaboración propia

5.2. Recocido simulado (SA)

Se mantendrán los valores de los coeficientes de ponderación con la finalidad de poder comparar en forma directa los resultados de este programa con los del algoritmo genético de objetivo simple.

α	β
1	30

Caso 1:

Tasa de enfriamiento (*CR-cooling rate)*	**Iteraciones**
$0,99$	1000

Figura 5.6 – Valor de la función objetivo vs. iteraciones (tasa de enfriamiento de 0,99). Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
$Valor\ de\ la\ función\ objetivo$	$373442\ [\$]$
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$18\ [vueltas]$
$Diámetro\ de\ columna$	$20\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$14,7\ [\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Al)\ 25\ x\ 12\ [mm]\ (3\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (Al)\ 4\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,7\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$598\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$99,96\ [dm^3]$
$Aletas$	$34\ aletas\ onduladas/Supf\ =\ 14,4\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$54,05\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$7913\ [\$]$
$Pérdidas\ totales$	$4961\ [W]$

Tabla 5.7 - Resultados de la simulación del SA con los parámetros del caso 1.
Fuente: Elaboración propia

Caso 2:

Tasa de enfriamiento (*CR-cooling rate*)	Iteraciones
$0,995$	1000

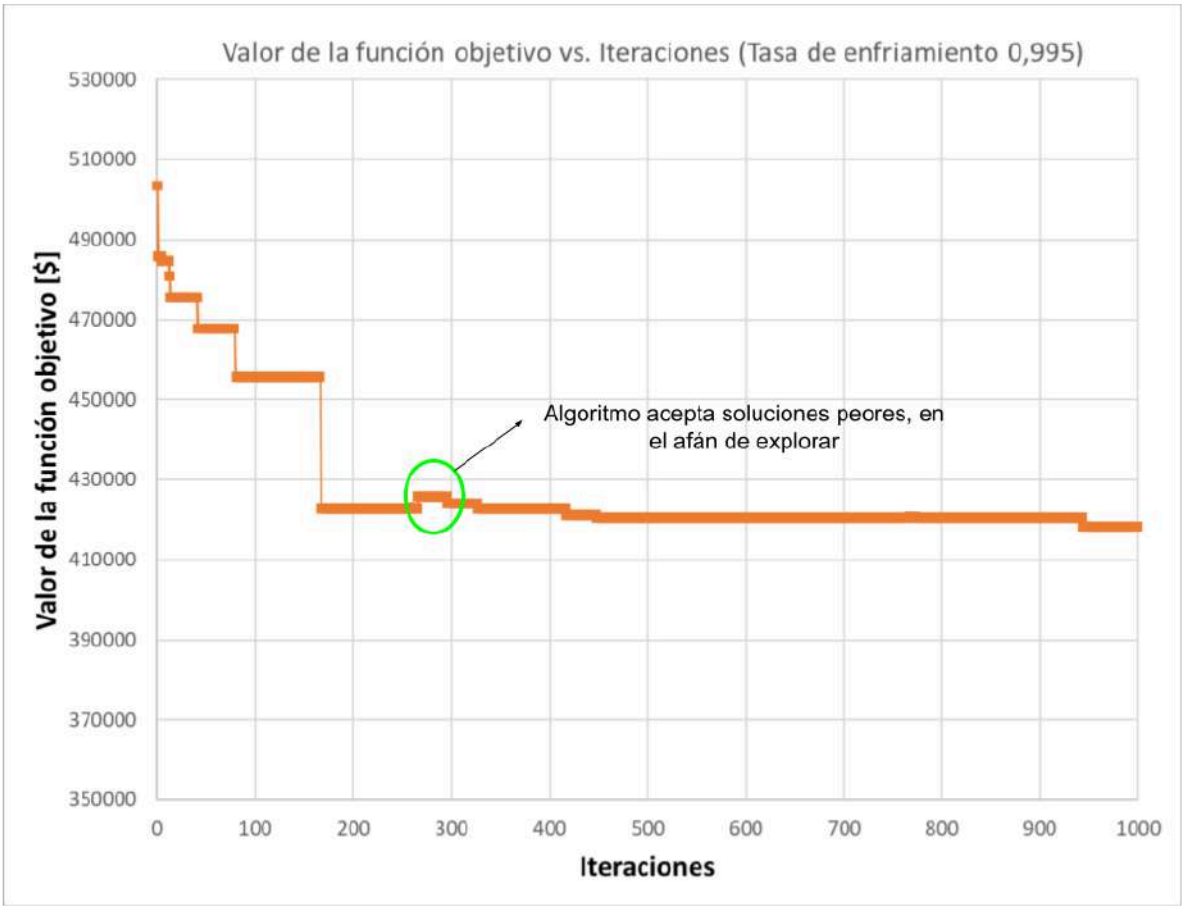


Figura 5.7 – Valor de la función objetivo vs. iteraciones (tasa de enfriamiento de 0,995).
Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
$Valor\ de\ la\ función\ objetivo$	$418328\ [\$]$
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$21\ [vueltas]$
$Diámetro\ de\ columna$	$19\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$16[\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Al)\ 25\ x\ 12\ [mm]\ (3\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (Cu)\ 2,8\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,65\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$507\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$94,8\ [dm^3]$
$Aletas$	$38\ aletas\ onduladas/Supf\ =\ 16,3\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$53,7\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$8800\ [\$]$
$Pérdidas\ totales$	$5581\ [W]$

Tabla 5.8 - Resultados de la simulación del SA con los parámetros del caso 2.
Fuente: Elaboración propia

Caso 3:

Tasa de enfriamiento (*CR-cooling rate)*	Iteraciones
$0,95$	1000

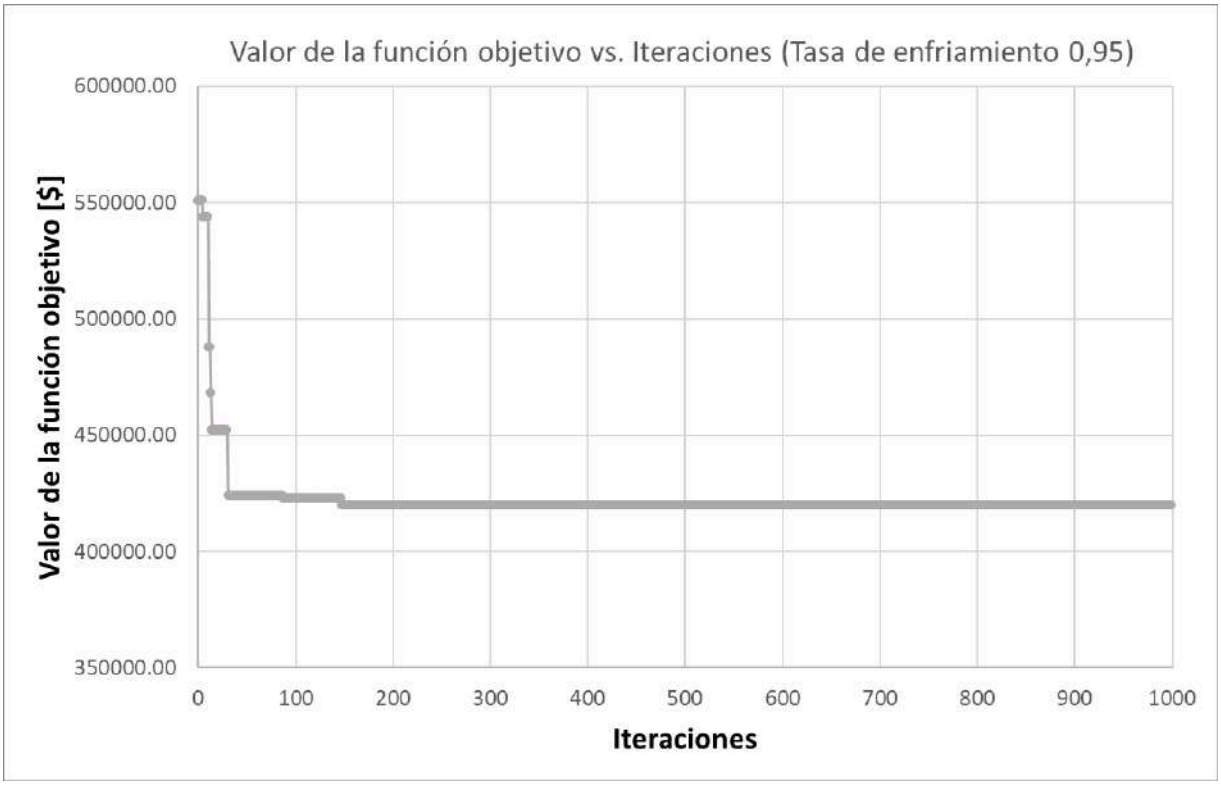


Figura 5.8 – Valor de la función objetivo vs iteraciones (tasa de enfriamiento de 0,95).
Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
Valor de la función objetivo	419780 [$]
Nro. Vueltas BT	21 $[vueltas]$
Diámetro de columna	19 $[cm]$
Coeficiente de utilización	$16[\frac{kVA}{dm^3}]$
Conductor BT	*Pletina* (Al) 25 x 12 $[mm]$ (3 *en paralelo*)
Conductor MT	*Redondo* (Cu) 2, 8 $[mm]$
Inducción máxima	1, 67 $[T]$
Volumen de aceite	503 $[L]$
Volumen de hierro	94, 8 $[dm^3]$
Aletas	38 *aletas onduladas*$/Supf = 16, 3\ [m^2]$
Máxima sobretemperatura aceite	53, 7 $[°C]$
Costo materiales	8678 [$]
Pérdidas totales	5772 $[W]$

Tabla 5.9 - Resultados de la simulación del SA con los parámetros del caso 3.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.9 a continuación, se plasma la evolución de los tres casos analizados:

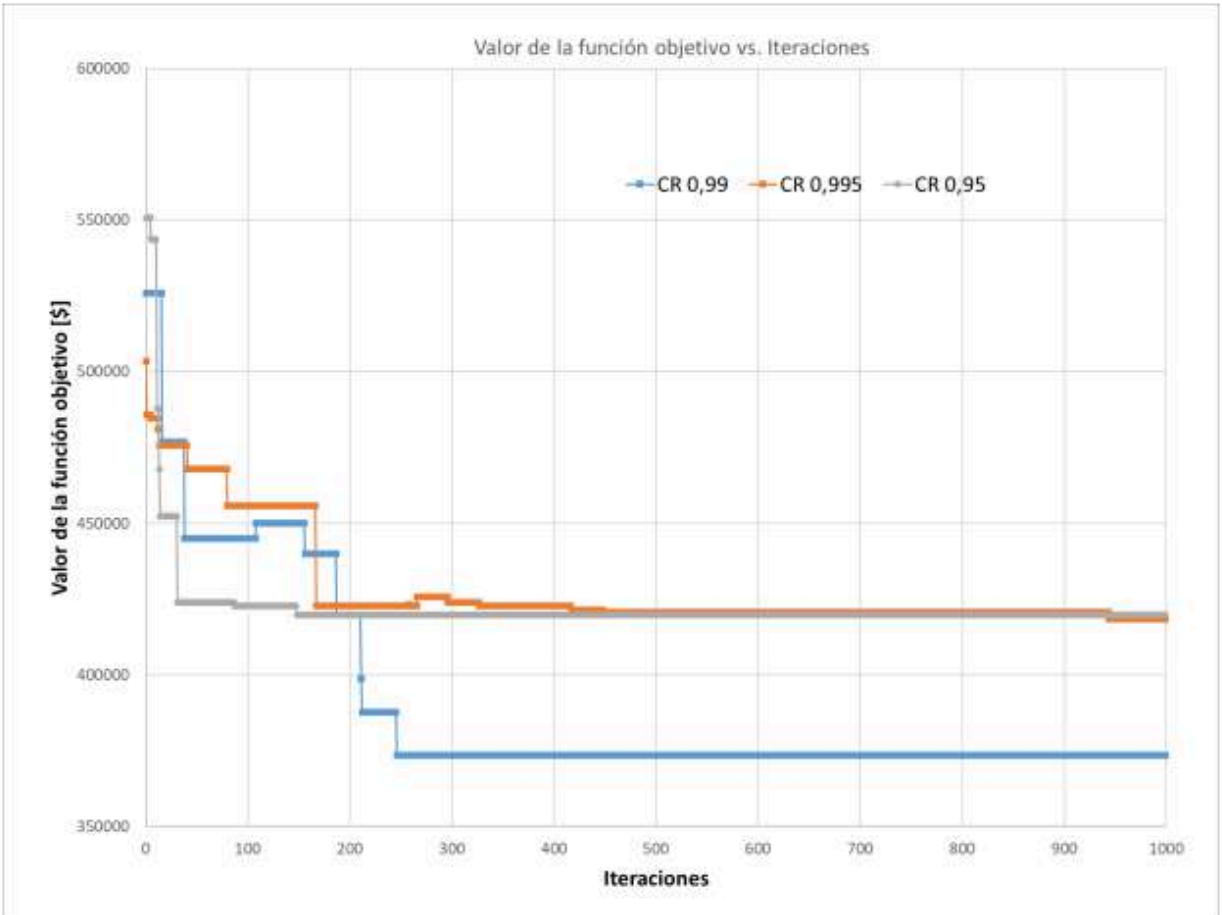


Figura 5.9 – Evolución de las tres simulaciones de recocido simulado (SA).
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5.10 complementa a la gráfica y comenta las diferencias en los comportamientos de cada configuración empleada para el recocido simulado.

Nombre en leyenda	Color	Descripción	Comportamiento y efectividad
CR0,99	Azul	1000 iteraciones Tasa de enfriamiento: 0,99	Es la configuración que mejor resultado obtuvo. Explora un gran campo de soluciones (incluso acepta una solución peor cercano a las 110 iteraciones)
CR0,995	Naranja	1000 iteraciones Tasa de enfriamiento: 0,995	Tasa de enfriamiento demasiado leve. El algoritmo tarda en tornarse exigente y cercano a la iteración 300 sigue aceptando soluciones peores a las previas. Cerca de la iteración 950 sigue encontrando soluciones levemente mejores. Es una configuración que resulta en un comportamiento lento y laxo.
CR0,95	Gris	1000 iteraciones Tasa de enfriamiento: 0,95	Tasa de enfriamiento demasiado agresiva. El algoritmo se torna exigente muy rápido por lo que explora un campo de soluciones muy reducido. Por esto, no halla una buena solución final y resulta extremadamente dependiente de las soluciones generadas en las primeras iteraciones. Es una configuración que lleva a un comportamiento demasiado rápido y agresivo.

Tabla 5.10 - Comparación del comportamiento del SA en cada uno de los 3 casos.
Fuente: Elaboración propia

5.3. NSGA-II

Por ser un método de optimización multiobjetivo, NSGA-II no necesita de una única función objetivo. De esta manera, devuelve tantas soluciones no-dominadas como encuentre y no una única "mejor" solución. La gráfica de la Figura 5.10 muestra los resultados hallados tras correr al programa con los parámetros que mejor resultado dieron para el GA. Se observa que de una población de 12 soluciones, sólo se grafican las 7 soluciones no-dominadas que definen el frente de Pareto.

Población	Generaciones	Mutación
12	200	Primera mitad: $2\ genes$ Segunda mitad: $1\ gen$

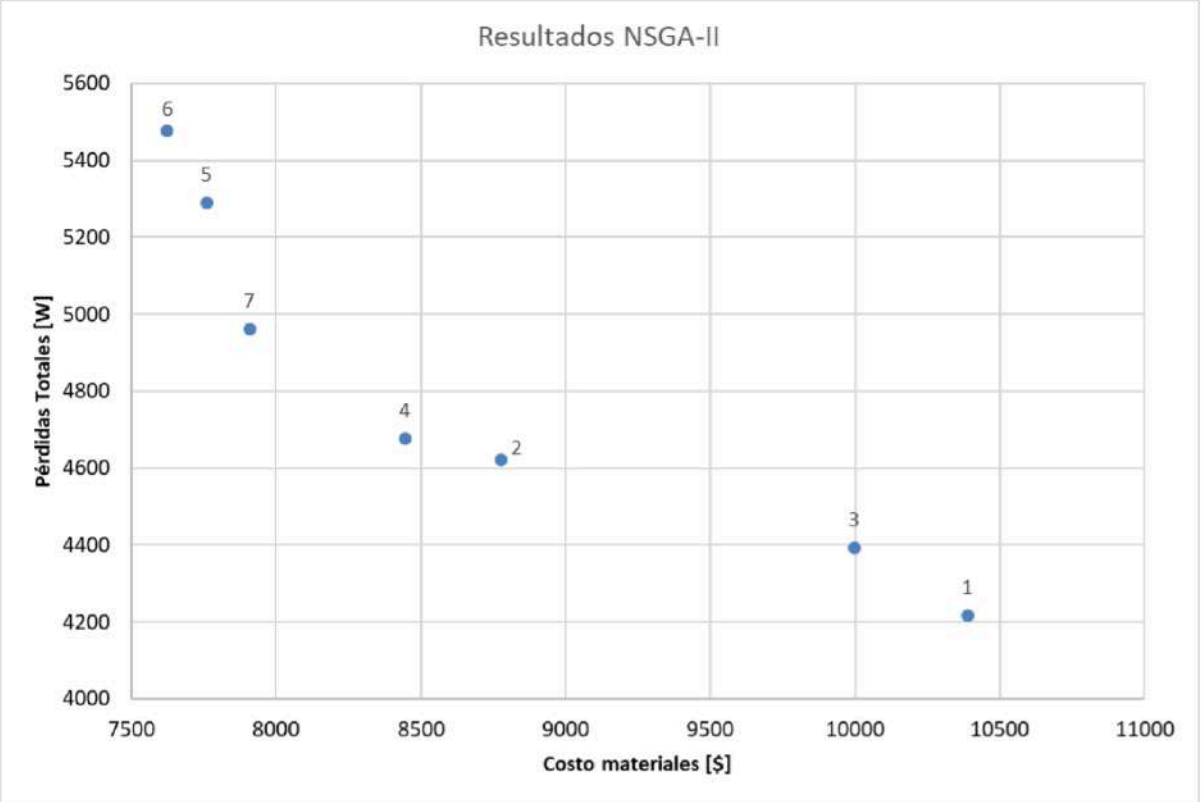


Figura 5.10 – Resultados NSGA-II. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la Figura 5.11 muestra la evolución del frente de Pareto a lo largo de algunas generaciones características. Es evidente que la distancia entre el frente de la generación 50 y la 100 es mucho mayor al que hay entre el de la generación 150 y la 200. Esto se debe a que el algoritmo primero hace un ajuste grueso al explorar un campo amplio de soluciones y luego un ajuste más fino entre las opciones más óptimas.

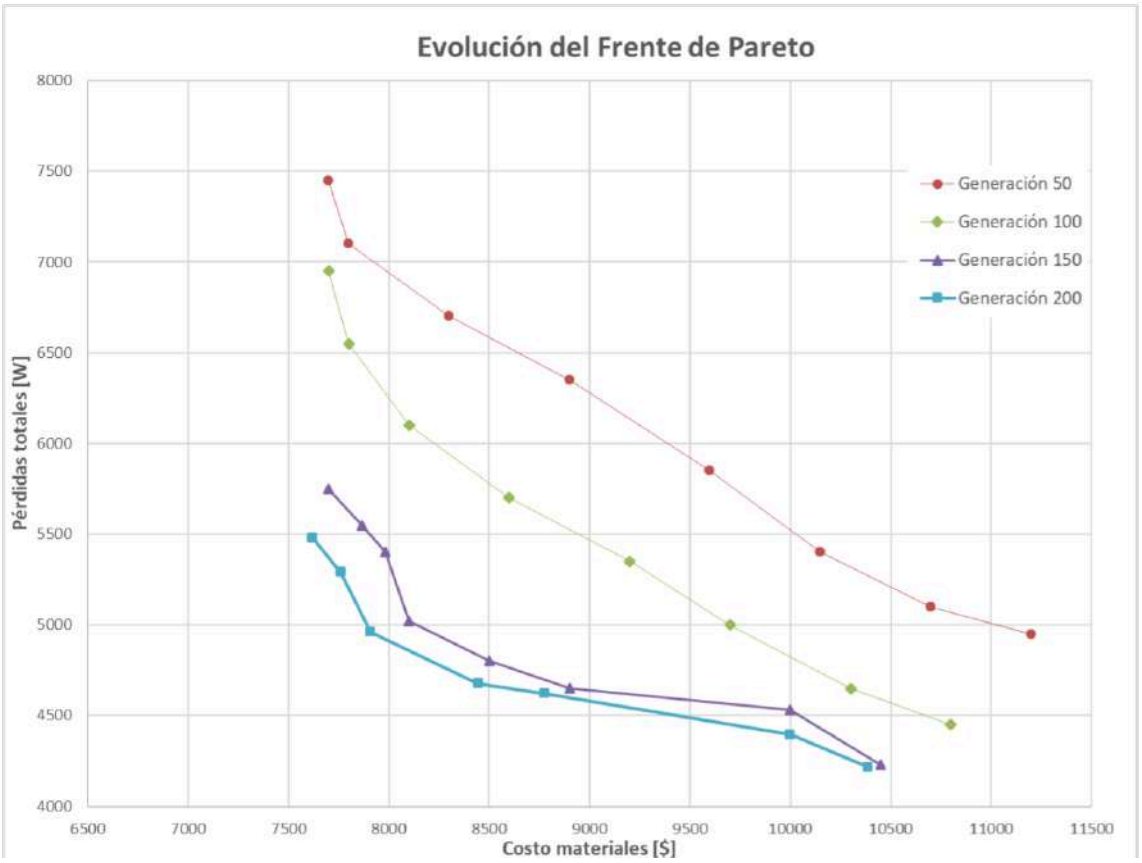


Figura 5.11 – Evolución del frente de Pareto a lo largo de las generaciones. Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5.11 muestra los valores de los objetivos y de las variables de diseño para cada una de las 6 soluciones no-dominadas halladas:

	Costo materiales [$]	Pérdidas totales [W]	Nro. vueltas BT	Diámetro columnas [cm]	Coeficiente de utilización $[\frac{kVA}{dm^3}]$	Conductor BT [mm]	Conductor MT [mm]	Ind. Máx. [T]
1	10386, 9	4216, 2	20	20	11, 9	$25x12$ [Al]	Ø 5, 5 [Al]	1, 61
2	8524, 3	4677, 4	20	20	11, 9	$25x12$ [Al]	Ø 4, 5 [Al]	1, 6
3	9999, 1	4394, 1	20	20	11, 9	$25x12$ [Al]	Ø 5 [Al]	1, 6
4	8777, 39	4621, 5	21	19	15	$30x6$ [Al]	Ø 5 [Al]	1, 65
5	7760, 9	5290, 2	21	19	15	$30x6$ [Al]	Ø 4 [Al]	1, 65
6	7622, 8	5477	21	19	14, 4	$30x6$ [Al]	Ø 3, 8 [Al]	1, 66
7	7910	4961	18	20	15	$25x12$ [Al]	Ø 4 [Al]	1, 7

Tabla 5.11 - Soluciones no-dominadas halladas por NSGA-II

5.4. Comparación de los métodos de optimización

Sobre la gráfica del frente de Pareto hallado por el método de optimización multiobjetivo NSGA-II se pueden graficar, también, las mejores soluciones halladas por los métodos de objetivo simple. Se recuerda que dichas soluciones fueron, en cada caso, las siguientes:

	Costo materiales [$]	Pérdidas totales [W]	Nro. v. BT	Diámetro columnas [cm]	Coef. de utilización $[\frac{kVA}{dm^3}]$	Conductor BT [mm]	Conductor MT [mm]	Ind. Máx. [T]
GA	8365	4603	18	21	$13,6$	$30x6$ [Al]	Ø $4,5$ [Al]	$1,6$
SA	7913	4951	18	20	$14,7$	$25x12$ [Al]	Ø 4 [Al]	$1,7$

Tabla 5.12 - Soluciones halladas por GA y SA. Fuente: Elaboración propia

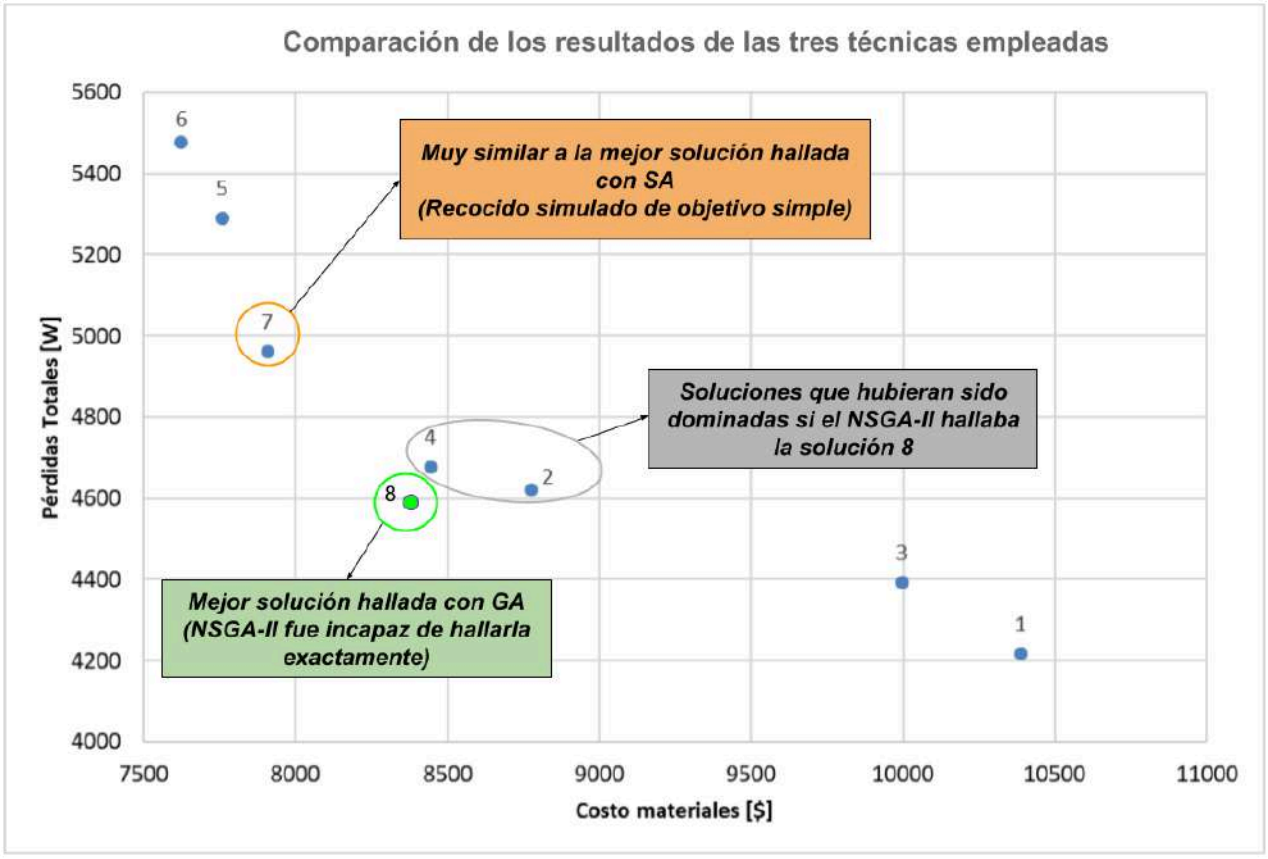


Figura 5.12 – Resultados de los tres métodos de optimización empleados. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la solución 7 hallada por el NSGA-II es muy similar a la mejor solución encontrada por el algoritmo de recocido simulado (SA). Sin embargo, el método de optimización multiobjetivo fue incapaz de hallar una solución idéntica a la mejor que encontró el algoritmo genético de objetivo simple (GA-1). De haberlo hecho, dicha solución hubiera sido no-dominada y eliminaría del frente de Pareto a las soluciones 2 y 4 que encontró el NSGA-II.

Es probable que el NSGA-II no haya logrado encontrar la mejor solución obtenida por el GA-1 debido a la propia naturaleza de su algoritmo. Aunque alcanza la solución 4, que es muy similar, su enfoque no está en optimizar una única solución, sino en explorar un conjunto diverso de alternativas no dominadas a lo largo del frente de Pareto. Por esta razón, no termina de ajustar la solución 4 hasta convertirla en la solución 8, que fue la mejor obtenida por el GA.

Este fenómeno pone de manifiesto el potencial que puede tener la combinación estratégica de técnicas metaheurísticas en procesos de optimización complejos. En particular, destaca una posible sinergia entre el algoritmo NSGA-II y el algoritmo genético GA. Mientras que NSGA-II es eficaz para generar un conjunto diverso de soluciones no dominadas a lo largo del frente de Pareto, su enfoque en la exploración amplia puede limitar la capacidad de afinar soluciones individuales hasta su punto óptimo local.

A partir de esto, surge una propuesta interesante: utilizar NSGA-II como una fase inicial para identificar un conjunto representativo de soluciones prometedoras, y luego aplicar GA de manera individual a cada una de ellas, con el objetivo de mejorar su rendimiento específico. Esta estrategia combinada podría aprovechar lo mejor de ambos algoritmos—la diversidad y cobertura del frente de Pareto por parte de NSGA-II, y la capacidad de explotación local de GA—lo que incrementa las probabilidades de alcanzar soluciones más cercanas al óptimo global.

La Tabla 5.13 compara aspectos de los tres métodos de optimización empleados:

	Objetivo	Cantidad de soluciones analizadas	Duración del algoritmo (carga computacional)*	Dependencia de la población inicial	Comentarios
Algoritmo Genético (GA)	Simple	2400	27 *minutos*	Alta	Devuelve una única solución que dependerá de los valores dados a los coeficientes de ponderación α y β
Recocido simulado (SA)	Simple	1000	13 *minutos*	Media	Devuelve una única solución que dependerá de los valores dados a los coeficientes de ponderación α y β. Logra hallar soluciones similares al GA-1 pero con menor carga computacional
NSGA-II	Múltiple	2400	32 *minutos*	Baja	Devuelve varias soluciones "igualmente" beneficiosas, por lo que requiere de un análisis posterior.

Tabla 5.13 - Comparación de las tres técnicas metaheurísticas empleadas. Fuente: Elaboración propia

**Los tiempos de simulación son los asociados a una PC con las características detalladas en el Anexo 7*

En conclusión, si bien los tres métodos resultaron efectivos para resolver el problema de optimización planteado, los enfoques de objetivo simple requieren una ponderación precisa de los términos en la función objetivo para identificar la solución que realmente se ajuste a los intereses del usuario. Esta ponderación, sin embargo, no es fácil de cuantificar de antemano. Por otro lado, el método de objetivo múltiple

permite analizar y decidir a qué criterios otorgar mayor relevancia posteriormente, con las soluciones ya halladas.

En cualquier escenario, ya sea al ponderar una función objetivo o al seleccionar entre las soluciones no-dominadas de una técnica multiobjetivo, es imprescindible la intervención de expertos en la materia para asegurar la relevancia y fiabilidad de los resultados.

5.5. Variaciones en los coeficientes de ponderación

Se estudiará, utilizando al GA, el efecto de las variaciones en los coeficientes de ponderación de la función objetivo - a través de α y β - sobre las soluciones que encuentra un algoritmo de objetivo simple. De este modo, será posible interpretar cómo la importancia asignada a cada término de la función objetivo favorece a los distintos actores involucrados en la fabricación, adquisición y uso de un transformador de distribución.

Como ya se ha mencionado, para que el término asociado a las pérdidas tenga un valor similar al del costo de materiales, los coeficientes de ponderación debían ser $\alpha = 1$ y $\beta = 30$ en:

$$Función\ Obj. = \alpha \cdot Costo\ pérdidas\ [\$] + \beta \cdot Costo\ materiales\ [\$]$$

Se mantiene α fija y se varía β para estudiar sus efectos, a sabiendas de que es únicamente la relación entre ambos coeficientes la que realmente influye sobre el problema.

α	β
1	100

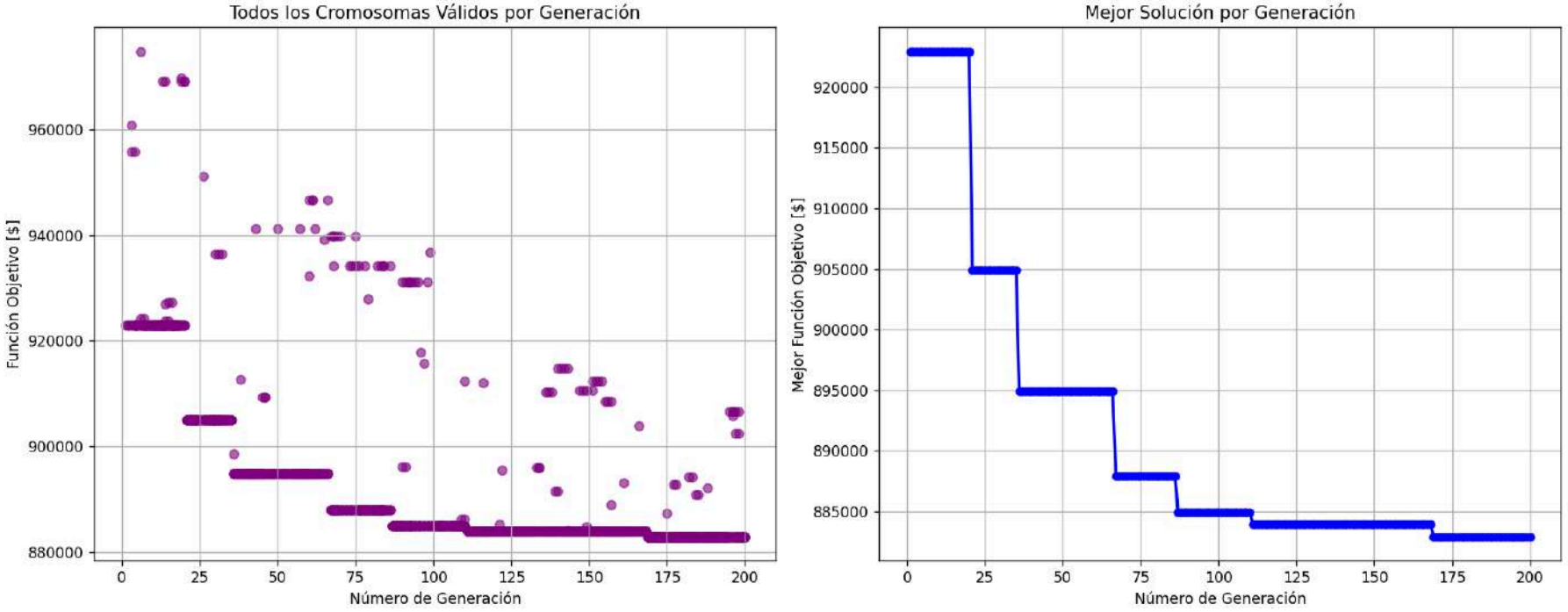


Figura 5.13 – Evolución de la función objetivo con coeficientes de ponderación α = 1 y β = 100. población total (izquierda) y mejor solución (derecha).
Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$21\ [vueltas]$
$Diámetro\ de\ columna$	$19\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$14,4[\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Al)\ 30\ x\ 6\ [mm]\ (4\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (AL)\ 3,8\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,66\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$592\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$106\ [dm^3]$
$Aletas$	$33\ aletas\ onduladas/Supf\ =\ 15,7\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$54,9\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$7622[\$]$
$Pérdidas\ totales$	$5476\ [W]$

Tabla 5.14 - Resultados para $\alpha = 1$ y $\beta = 100$. Fuente: Elaboración propia

Esta solución coincide con la configuración número 6 hallada por el NSGA-II.

Si ahora se disminuye el valor del coeficiente β:

α	β
1	15

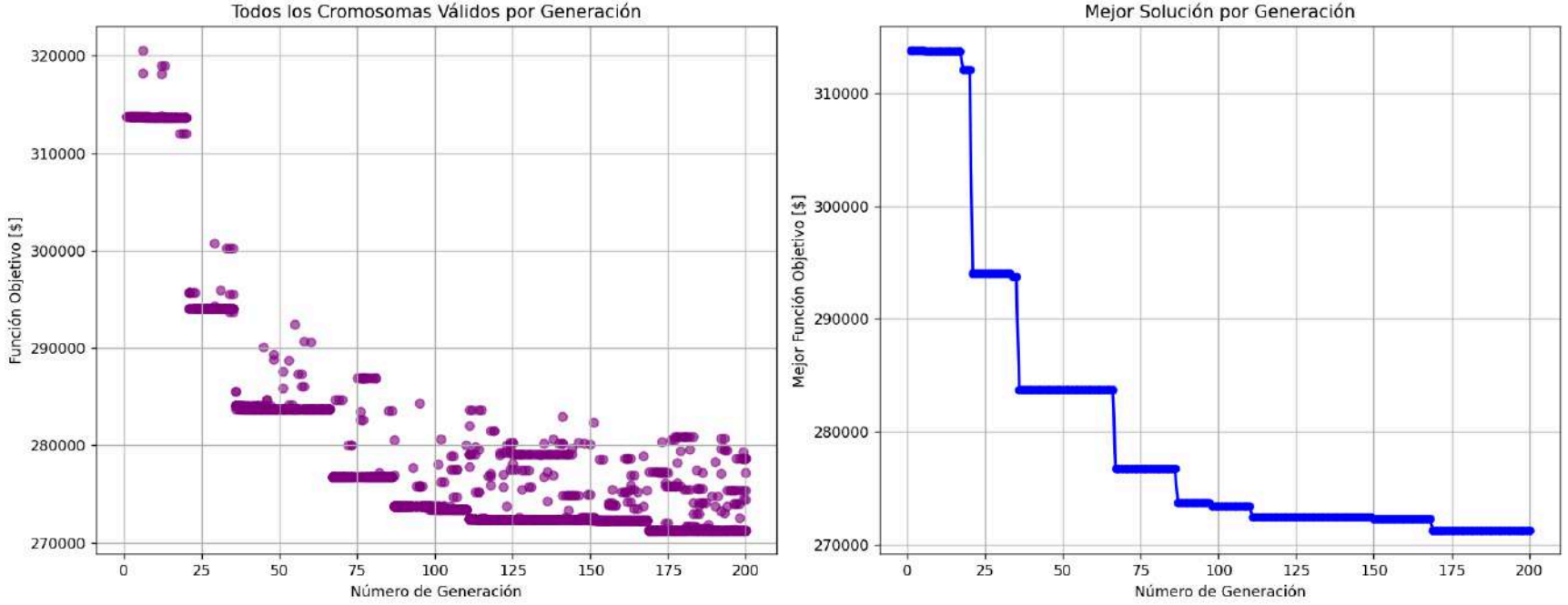


Figura 5.14 – Evolución de la función objetivo con coeficientes de ponderación α = 1 y β = 15. población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$20\ [vueltas]$
$Diámetro\ de\ columna$	$20\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$11,7[\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Al)\ 25\ x\ 12\ [mm]\ (3\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (AL)\ 5\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,6\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$743[L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$127,5\ [dm^3]$
$Aletas$	$26\ aletas\ onduladas/Supf\ =\ 12,7\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$54,6\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$9998\ [\$]$
$Pérdidas\ totales$	$4397\ [W]$

Tabla 5.15 - Resultados para $\alpha = 1$ y $\beta = 15$. Fuente: Elaboración propia

Esta solución se asemeja a la configuración número 3 hallada por el NSGA-II.

Si, nuevamente, se disminuye el valor del coeficiente β:

α	β
1	5

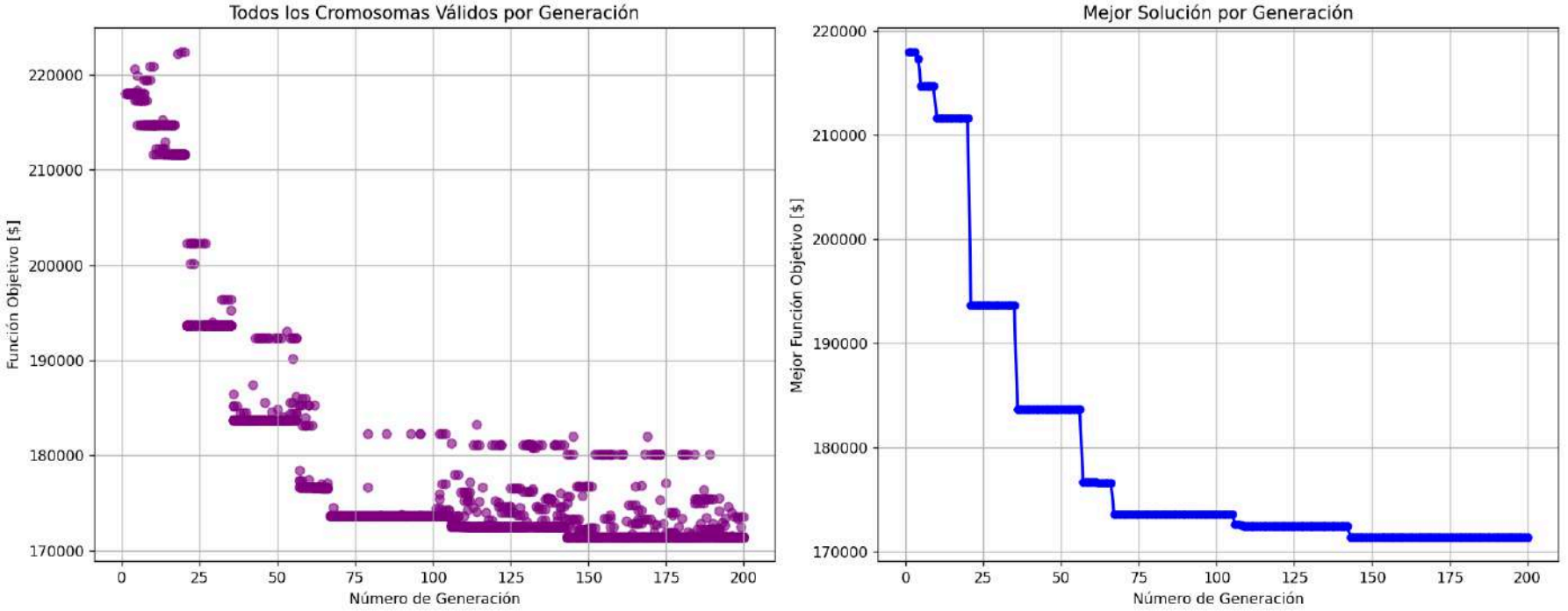


Figura 5.15 – Evolución de la función objetivo con coeficientes de ponderación α = 1 y β = 5. población total (izquierda) y mejor solución (derecha). Fuente: Elaboración propia

Mejor solución	
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$20\ [vueltas]$
$Diámetro\ de\ columna$	$20\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$11,9[\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Al)\ 25\ x\ 12\ [mm]\ (3\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (AL)\ 5,5\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,61\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$829\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$140,5\ [dm^3]$
$Aletas$	$23\ aletas\ onduladas/Supf\ =\ 12,16\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$54,65\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$10386\ [\$]$
$Pérdidas\ totales$	$4217\ [W]$

Tabla 5.16 - Resultados para $\alpha = 1$ y $\beta = 5$. Fuente: Elaboración propia

Si se plasman estos resultados sobre la gráfica de resultados del NSGA-II, se observa que una mayor ponderación del término de costo de materiales (mayor β) lleva a que se busque minimizar más dicho aspecto (Figura 5.16). Por lo tanto, las soluciones halladas por el GA-1 se trasladan a lo largo del frente de Pareto.

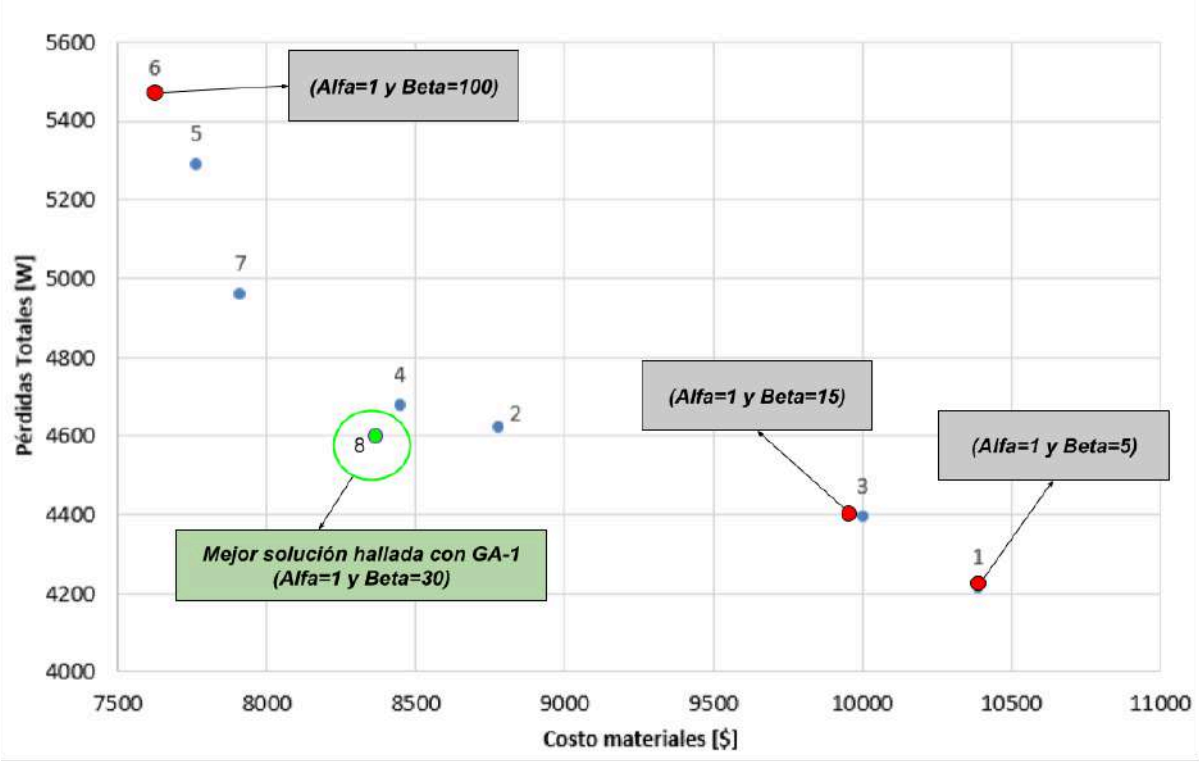


Figura 5.16 – Resultados de los tres métodos de optimización empleados. Fuente: Elaboración propia

Se observa que al mantener a $\alpha = 1$:

	Importancia costos materiales	Importancia costos pérdidas	Participante beneficiado
$\beta < 30$	Baja	Alta	Usuario
$\beta = 30$	Media	Media	Ambos por igual
$\beta > 30$	Alta	Baja	Fabricante

Tabla 5.17 - Efecto de los coeficientes de ponderación α y β sobre la interpretación de los resultados. Fuente: Elaboración propia

De esta manera, el traslado a través del frente de Pareto implica saltar entre soluciones que traen mayor beneficios para una u otra parte del proceso de compra de un transformador de distribución, tal como indica la Figura 5.17.

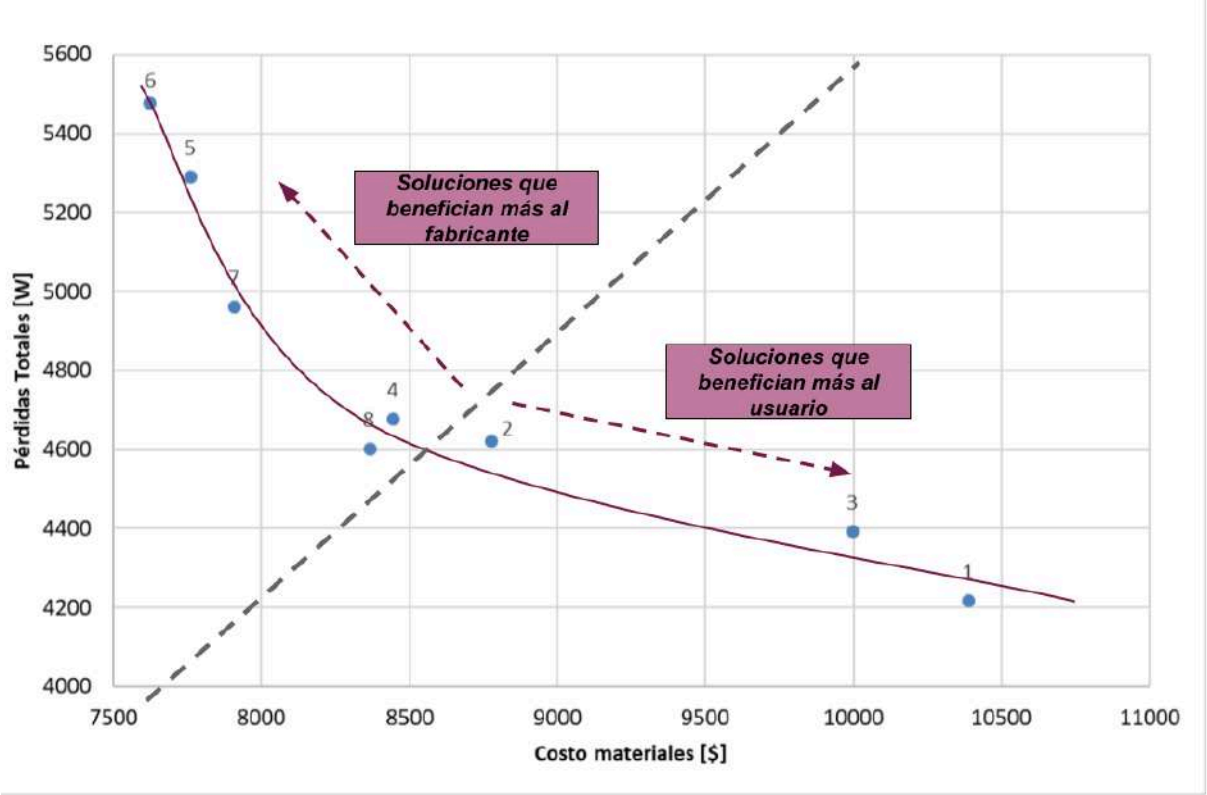


Figura 5.17 – Resultados de los tres métodos de optimización empleados. Fuente: Elaboración propia

Las soluciones que benefician más al fabricante son aquellas con menor costo de material. Estudiando los resultados encontrados, se observa que se trata de transformadores con mayor coeficiente de utilización e inducción máxima. De esta forma, se logra aprovechar al máximo los materiales empleados y disminuir el volumen del transformador (en conductor, aislantes y aceite).

Por otro lado, las soluciones que benefician al usuario cuentan con menores pérdidas. Esto se logra a través de la utilización de menores niveles de inducción y de coeficientes de utilización, por lo que resultan transformadores más voluminosos.

	Coeficiente de Utilización	Inducción máxima	Volumen del transformador
Soluciones que benefician al fabricante	Elevado	Elevado	Reducido
Soluciones que benefician al usuario	Bajo	Bajo	Elevado

Tabla 5.18 - Características de los transformadores según el grupo participante "beneficiado". Fuente: Elaboración propia

5.6. Aluminio vs. Cobre

Este apartado tiene como objetivo analizar las diferencias estructurales y las pérdidas en transformadores de igual potencia con devanados de aluminio y cobre. Se compararán sus dimensiones, pérdidas y estructura de costos.

5.6.1. Ventajas y desventajas del uso de aluminio y cobre en transformadores de distribución

La selección del material conductor en transformadores es un aspecto determinante en su eficiencia, costos y adaptabilidad a entornos operativos. Este capítulo explora las características técnicas del aluminio y cobre, enfocándose en su aplicación en arrollamientos de transformadores de distribución. A través de un análisis basado en propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas, se identifican escenarios donde cada material ofrece ventajas competitivas, respaldado por datos experimentales y normativas técnicas.

Conductividad

El cobre ha sido históricamente el material predilecto por su alta conductividad eléctrica ($57\ m/\Omega{\cdot}mm^2$), que permite diseños compactos con menores pérdidas Joule. Sin embargo, el aluminio ($36\ m/\Omega{\cdot}mm^2$) emerge como alternativa viable gracias a su menor densidad ($2.7\ vs.\ 8.9\ kg/dm^3$), reduciendo el peso total del transformador en hasta un 60%.

La diferencia en conductividad lleva a que las secciones de aluminio necesarias, para que tengan un comportamiento eléctrico equivalente a una de cobre, sean 58% mayores:

$$\frac{Conductividad\ Cu}{Conductividad\ Al} = \frac{S_{Al}}{S_{Cu}} = \frac{57\ [\frac{m}{\Omega{\cdot}mm^2}]}{36\ [\frac{m}{\Omega{\cdot}mm^2}]} = 1,58 \qquad (5.1)$$

Comportamiento ante sobrecargas

La capacidad calorífica C_c se entiende como la capacidad de un cuerpo de transferir calor al medio ambiente. Depende no sólo del calor específico del material C_e, sino también de la masa de material M presente. De esta forma:

$$\frac{C_{c\,Al}}{C_{c\,Cu}} = \frac{C_{e\,Al} \cdot M_{Al}}{C_{e\,Cu} \cdot M_{Cu}} \qquad (5.2)$$

La Tabla 5.19 muestra los valores de calor específico de cada material:

	Cobre	Aluminio
Calor específico C_e en$[\frac{cal}{g \cdot °C}]$	0,092	0,220

Tabla 5.19 - Calor específico del cobre y del aluminio. Fuente: Elaboración propia

Además, si se tiene en cuenta que las secciones de aluminio deben ser 58% más grandes y se conocen las densidades de ambos materiales, se obtiene que en arrollamientos equivalentes, los de aluminio pesan menos de la mitad (48%) que los de cobre:

$$\frac{M_{Al}}{M_{Cu}} = \frac{V_{Al}}{V_{Cu}} \cdot \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} = 1,58 \cdot \frac{2,7\,[\frac{Kg}{dm^3}]}{8,9\,[\frac{Kg}{dm^3}]} = 0,48 \qquad (5.3)$$

Donde:
ρ_{Al} y ρ_{Cu} son las densidades del aluminio y del cobre respectivamente.

De esta manera, se obtiene que el aluminio es un 16% mejor en disipar calor al ambiente circundante:

$$\frac{C_{c\,Al}}{C_{c\,Cu}} = \frac{C_{e\,Al} \cdot M_{Al}}{C_{e\,Cu} \cdot M_{Cu}} = \frac{0,220}{0,092} \cdot 0,48 = 1,16$$

La figura 5.17 muestra la evolución de la temperatura en ambos materiales ante sobrecargas. Se observa que en el caso de que los interruptores no actúen, el devanado de cobre llega a la temperatura de deterioro de la aislación con mayor velocidad ($T_1 < T_2$). Por lo tanto, en este contexto, los devanados de aluminio protegen mejor a la aislación de la máquina y retrasan el envejecimiento del aceite.

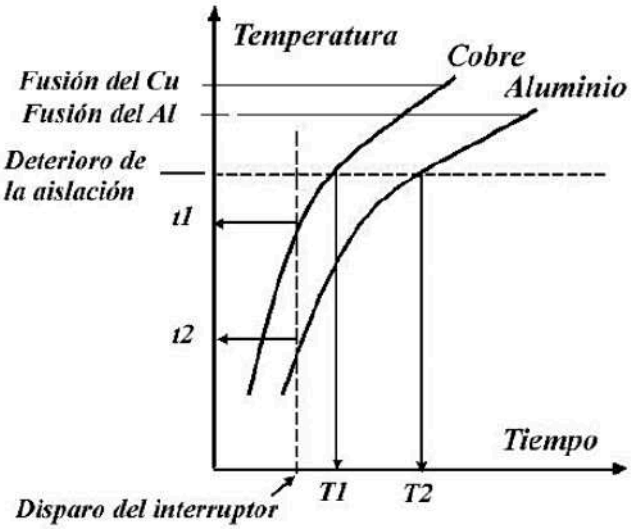


Figura 5.18 – Comportamiento térmico del cobre y del aluminio frente a una sobrecarga. Fuente [4]

Comportamiento dinámico

Durante un evento de cortocircuito, los arrollamientos de un transformador están sujetos a esfuerzos mecánicos críticos derivados de las fuerzas electromagnéticas generadas por la interacción entre el campo magnético disperso y las corrientes elevadas. Estos esfuerzos se manifiestan en dos dimensiones:

- **Esfuerzos axiales y longitudinales**: Comprometen la integridad estructural de las bobinas, pudiendo causar deformaciones o desplazamientos en la dirección del eje del núcleo.
- **Esfuerzos radiales**: Generan fuerzas de flexión opuestas en los devanados interno y externo, sometiendo las espiras a tensiones que pueden provocar pandeo o microfisuras en los conductores.

En particular, las fuerzas radiales —producto de la distribución asimétrica del flujo magnético— actúan perpendicularmente al plano de las espiras, con sentidos contrarios en cada arrollamiento (el devanado de alta tensión tiende a expandirse, mientras el de baja se comprime). Este fenómeno, resalta la importancia de seleccionar materiales con resistencia mecánica adecuada, como el cobre (mayor límite elástico) o el aluminio (mayor ductilidad), para mitigar riesgos de falla prematura.

Compatibilidad con transformadores de resina epoxi

Si bien pierde un poco de importancia en el contexto de este trabajo en el que sólo se consideran transformadores inmersos en aceite, los transformadores de resina epoxi representan gran parte del mercado.

En los transformadores encapsulados en resina epoxi, la dilatación térmica uniforme entre los materiales es fundamental para garantizar la integridad del aislamiento a lo largo del tiempo. En este aspecto, los arrollamientos de aluminio presentan una

ventaja clave frente a los de cobre debido a su coeficiente de dilatación térmica ($24 \,.\, 10^{-6}/°C$), que es mucho más cercano al de la resina epoxi ($30 \,.\, 10^{-6}/°C$) que el del cobre ($17 \,.\, 10^{-6}/°C$).

La utilización de devanados de aluminio en estos transformadores tiene las siguientes implicancias:

- **Menor riesgo de microfisuras:** Al expandirse y contraerse de manera más sincronizada con la resina durante los ciclos térmicos de carga, se reducen las tensiones mecánicas en la interfaz conductor-aislante.
- **Mayor durabilidad en encapsulados:** Evita la formación de cavidades o delaminaciones que podrían generar descargas parciales y degradar el aislamiento prematuramente.
- **Optimización para transformadores secos:** La mejor adaptación térmica del aluminio lo convierte en la elección preferida para transformadores encapsulados sin aceite, donde la disipación de calor depende en gran medida de la estabilidad del sistema conductor-resina.

5.6.2. Comparación de transformadores de 630 [kVA] de aluminio y cobre

A través de la implementación de un algoritmo genético de objetivo simple, se obtendrán dos soluciones óptimas forzando el material de los bobinados a aluminio, en un caso, y a cobre en el otro. Los coeficiente de ponderación se mantendrán fijos en $\alpha = 1$ y $\beta = 30$.
Se observa que el transformador con arrollamientos de aluminio es más voluminoso en todo aspecto. Tiene un núcleo con $6\,[dm^3]$ más de hierro, una cuba mucho más voluminosa y $264\,[L]$ más de aceite que su transformador “gemelo” con arrollamientos de cobre. Esto resulta en un mayor costo total de materiales pero menores pérdidas totales.

La Tabla 5.20 detalla los diseños obtenidos para cada uno de los dos casos:

	Devanados de cobre	**Devanados de aluminio**
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$18\ [vueltas]$	$19\ [vueltas]$
$Nro.\ Vueltas\ MT$	$7\ galletas\ con\ 172\ [v]\ c/u$ $Bobinadas\ en\ 7\ capas$	$7\ galletas\ con\ 181\ [v]\ c/u$ $Bobinadas\ en\ 11\ capas$
$Diámetro\ de\ columna$	$21\ [cm]$	$20\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$15,5\ [\frac{kVA}{dm^3}]$	$14,87\ [\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ 25\ x\ 3\ [mm]$ $(4\ en\ paralelo)$	$Pletina\ 25\ x\ 12\ [mm]$ $(3\ en\ paralelo)$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ 2,7\ [mm]$	$Redondo\ 4,5\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,6\ [T]$	$1,62\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$449\ [L]$	$713\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$108,8\ [dm^3]$	$114,8\ [dm^3]$
$Volumen\ de\ prespan$	$9,54\ [cm^3]$	$34,9\ [cm^3]$
$Largo\ cuba$	$116\ [cm]$	$147\ [cm]$
$Ancho\ cuba$	$52\ [cm]$	$63\ [cm]$
$Alto\ cuba$	$91\ [cm]$	$97\ [cm]$
$Aletas$	$43\ aletas/Supf\ =\ 17\ [m^2]$	$32\ aletas/Supf\ =\ 13,5\ [m^2]$
$Máxima\ T°\ aceite$	$54,1\ [°C]$	$53,7\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$8399\ [\$]$	$9282\ [\$]$
$Pérdidas\ conducción$	$4781\ [W]$	$3368\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1074\ [W]$	$1196\ [W]$

Tabla 5.20 - Comparación de los transformadores de 630[kVA] de cobre y aluminio obtenidos. Fuente: Elaboración propia

La figura 5.19 esquematiza, a escala, a los dos transformadores obtenidos:

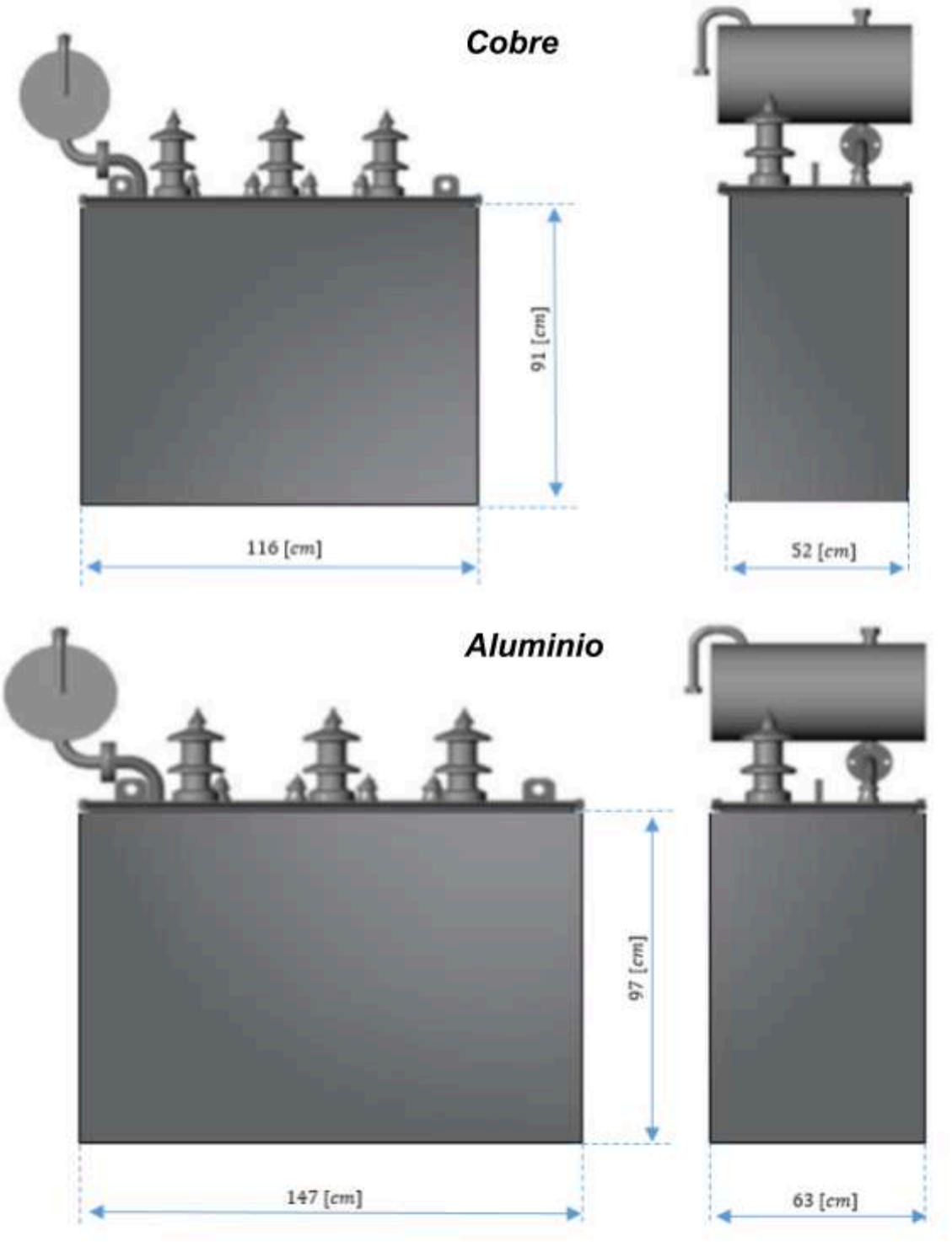


Figura 5.19 – Esquema de los transformadores obtenidos, con sus medidas acotadas. Fuente: Elaboración propia

La tabla 5.21 resume las principales diferencias entre los transformadores de distribución obtenidos:

	Comentario
Volumen de hierro	El transformador de aluminio tiene un núcleo con un volumen $5,5\ \%$ mayor que el de cobre
Volumen de presspan	El transformador de aluminio cuenta con un volumen de presspan $256\ \%$ mayor que el de cobre
Volumen de cuba	El transformador de aluminio cuenta con un volumen de cuba $64\ \%$ mayor que el de cobre
Volumen de aceite	El transformador de aluminio cuenta con un volumen de aceite $58,9\ \%$ mayor que el de cobre
Costo materiales	El transformador de aluminio tiene un costo total de materiales que es $10,5\ \%$ más caro que el de cobre
Pérdidas totales	El transformador de aluminio pérdidas totales que son $22\ \%$ menores a las del de cobre

Tabla 5.21 Comparación de volúmenes, costos y pérdidas de los transformadores obtenidos. Fuente: Elaboración propia

5.6.3. Comparación de la estructura de costos de los materiales

El cambio en el material conductor de los arrollamientos de la máquina conduce a variaciones de volúmenes y características de forma no lineal. Es así que la estructura de costos de un transformador de cobre resulta distinta a la de uno de aluminio de igual potencia. Más allá de que el transformador de aluminio haya resultado en uno con mayor costo de materiales, el cambio en material conductor también implica un cambio en la composición del costo total.

Para los transformadores diseñados, se obtuvieron las estructuras de costo de materiales mostradas en la Tabla 5.22:

	Transformador con arrollamientos de cobre	Transformador con arrollamientos de aluminio
Costo conductores	$ 2895	$ 1352
Costo hierro	$ 1806	$ 2098
Costo aceite	$ 3592	$ 5704
Costo presspan	$ 8	$ 29

Tabla 5.22 - Estructuras de costos de los transformadores obtenidos. Fuente: Elaboración propia

Llevado a diagramas de pastel para poder comparar las importancias porcentuales de cada material, se obtiene la figura 5.20:

Figura 5.20 – Comparación del costo en materiales entre un transformador con conductores de cobre y uno con conductores de aluminio. Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa, se puede destacar lo siguiente:

- En el transformador de aluminio los conductores representan menos de la mitad de lo que representan en el de cobre (15% frente a 35%)
- En el transformador de aluminio toma mucha más relevancia el costo del aceite que llega a representar 62% del costo total (mientras que en el de cobre solo el 43%)
- El transformador de aluminio será mucho más sensible a variaciones en el precio del aceite que el de cobre.
- El transformador de cobre será más sensible a variaciones en el precio de los conductores que el de aluminio (este argumento en contra de los transformadores de aluminio se mitiga con el hecho de que si bien el precio del cobre y del aluminio se mueven parejo, el aluminio tiene variaciones de precio porcentualmente menores, tal como muestra la Figura 5.21)

Figura 5.21 – Evolución del precio del cobre y el aluminio entre 2011 y 2023. Fuente [11]

5.6.4. Comparación de los resultados con transformadores comerciales

Si bien todos los diseños obtenidos cumplen con las restricciones establecidas y respetan los valores límite definidos por la norma IRAM 2250:2013, resulta conveniente realizar una comparación con transformadores comerciales existentes, a fin de analizar las diferencias en términos de dimensiones y verificar la viabilidad práctica de las soluciones propuestas.

En las Tablas 5.23 y 5.24 se puede observar la similitud de los transformadores diseñados con los disponibles comercialmente y se puede apreciar que la optimización logra una disminución en el tamaño de ambos transformadores. En todos los casos se trata de transformadores con una **potencia nominal de 630 kVA y tensiones 13,2/0,4 kV.**

Transformador de cobre de empresa Tubo Trans Electric

	Transformador obtenido a través de las herramientas de optimización	Transformador de la empresa Tubos Trans Electric
$Largo\ cubas\ (con\ aletas)$	$156\ [cm]$	$170\ [cm]$
$Ancho\ cuba\ (con\ aletas)$	$92\ [cm]$	$103\ [cm]$
$Alto\ cuba^{*}$	$91\ [cm]$	$108\ [cm]$
$Volumen\ de\ aceite$	$449\ [L]$	$405\ [L]$
$Pérdidas\ cobre$	$4781\ [W]$	$7250\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1074\ [W]$	$1450\ [W]$
$Costo\ materiales^{**}$	$8399\ [\$]$	$9643\ [\$]$

Tabla 5.23 - Comparación de transformadores de cobre. Fuente: [14]

Transformador de aluminio de empresa Alfanar

	Transformador obtenido a través de las herramientas de optimización	Transformador de la empresa Alfanar
$Largo\ cubas\ (con\ aletas)$	$157\ [cm]$	$155\ [cm]$
$Ancho\ cuba\ (con\ aletas)$	$83\ [cm]$	$95\ [cm]$
$Alto\ cuba^{*}$	$97\ [cm]$	$105\ [cm]$
$Volumen\ de\ aceite$	$713\ [L]$	$792\ [L]$
$Pérdidas\ aluminio$	$3368\ [W]$	$7250\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1196\ [W]$	$1450\ [W]$
$Costo\ materiales^{**}$	$9282\ [\$]$	$10954\ [\$]$

Tabla 5.24 - Comparación de transformadores de aluminio. Fuente: [15]

*Los valores obtenidos de catálogos fueron combinados para comparar medidas que representan la misma dimensión en el transformador diseñado y el disponible comercialmente.

**Los valores obtenidos de catálogos sólo indican cuánto del peso total del transformador corresponde al aceite, por lo que para estimar el costo de materiales del transformador disponible comercialmente y obtener un valor comparativo, al peso restante se le asume una composición distribuida porcentualmente igual que el diseñado (entre núcleo, conductores y aislación).

Todos los transformadores listados comercialmente, reportan pérdidas en cortocircuito y en vacío iguales a las exigidas por la norma IRAM (es decir, para un transformador de 630 kVA, 7250[W] y 1450 [W] respectivamente), por más que si bien los modelos tienen pérdidas cercanas a dicho valor, probablemente sean algo menores y algo distintas en cada transformador fabricado. Por lo tanto, si bien está claro que los transformadores optimizados tienen menores pérdidas, la única forma de saber cuánto menores son es hacer ensayos sobre los transformadores comerciales a utilizar como comparación.

Se observa que los transformadores optimizados logran mejorar a los comerciales en volumen, en costos de materiales y en pérdidas. Sin embargo, la ausencia de detalle en la composición interna de los transformadores disponibles comercialmente lleva a que un análisis posterior resulte algo inexacto. Por eso se limita la comparación a aquellos datos ciertos, como las dimensiones de la máquina y el volumen de aceite. La Figura 5.22 muestra las dimensiones de los 4 transformadores diseñados:

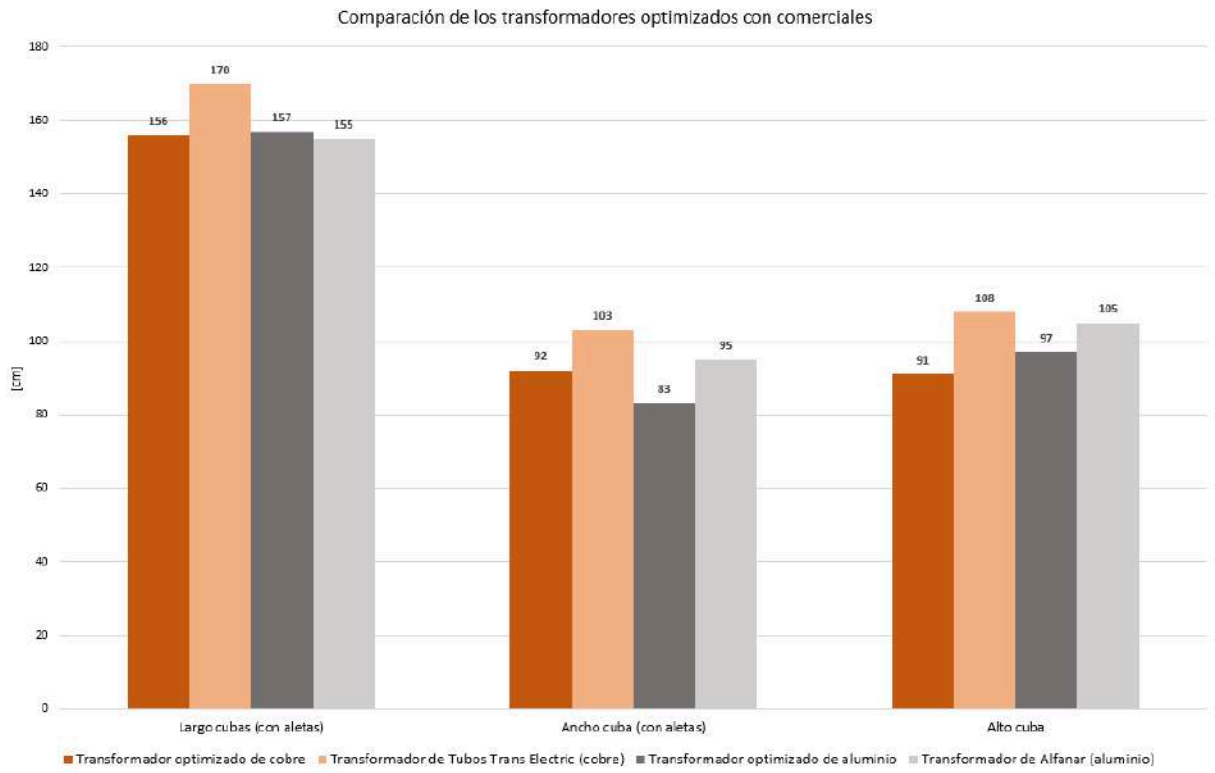


Figura 5.22 – Comparación de las tres dimensiones de los transformadores analizados. Fuente: Elaboración propia

El transformador de cobre optimizado resulta más pequeño que su par comercial en las tres dimensiones. Por otro lado, el transformador de aluminio optimizado ocupa un volumen total menor que su par comercial a pesar de ser 2 [cm] más largo (compensa al tener un menor ancho y una menor altura).

La Figura 5.23 compara los volúmenes de aceite de cada transformador. Como se observa, el volumen de aceite del transformador optimizado de aluminio es alrededor de 80 litros menor al de su par comercial. Por otro lado, el volumen de aceite del transformador optimizado de cobre es 44 litros mayor que el de su par comercial, a pesar de tener un volumen total menor. Esto sugiere que internamente el transformador optimizado cuenta con un núcleo, bobinados y aislación significativamente más pequeños que los del comercial, que surge de un mayor aprovechamiento del espacio y de la elección óptima de configuraciones geométricas de bobinados.

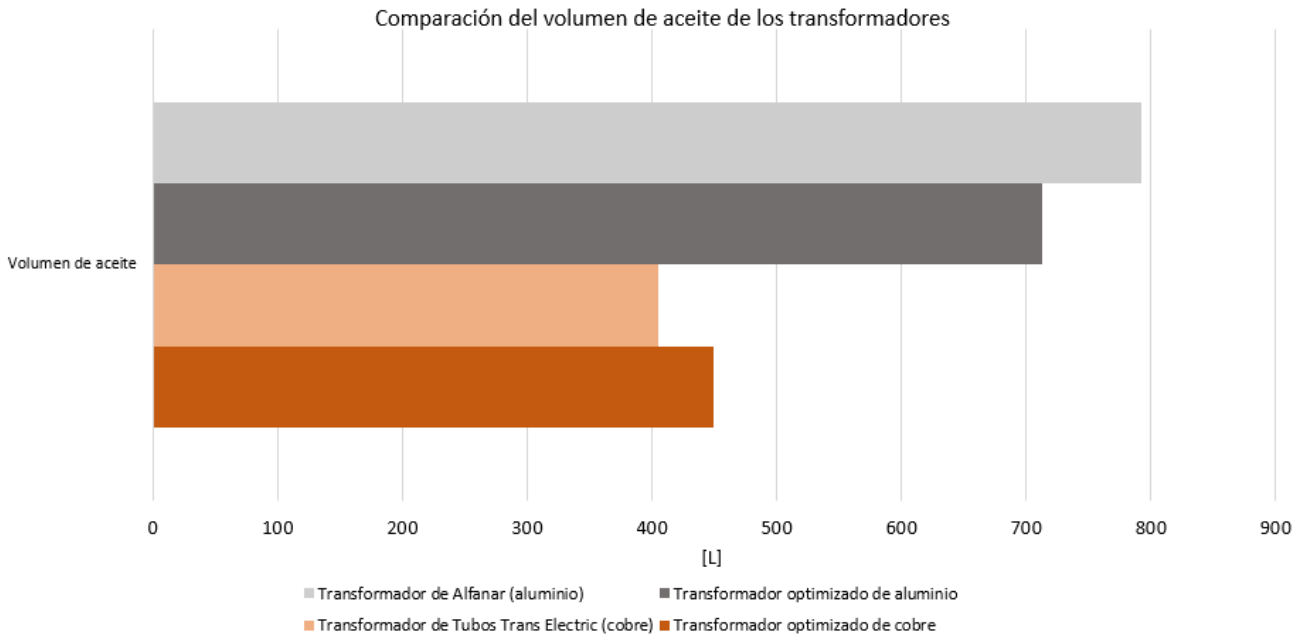


Figura 5.23 – Comparación del volumen de los transformadores analizados. Fuente: Elaboración propia

De todas formas, la comparación con transformadores comerciales cumple el propósito de demostrar que los modelos optimizados no sólo cumplen todas las restricciones, sino que también mejoran a las máquinas ya existentes y lo hacen en valores razonables y lógicos.

Cabe destacar que en la actualidad, en Argentina los fabricantes prefieren construir transformadores con arrollamientos de aluminio simplemente para evitar robos, no por cuestiones de conveniencia técnica.

5.7. Comparación de los resultados con los métodos de cálculo tradicionales

A continuación, se comparan los resultados obtenidos, con el transformador calculado en el anexo B " Cálculo completo de un transformador de distribución de 630 kVA" del libro "Cálculo y construcción de transformadores". Ambos transformadores diseñados son de la misma potencia y se forzó al programa a diseñar un transformador de cobre para poder hacer comparación con el diseñado en la bibliografía ya que este no consideró al aluminio como opción. [4]

	Resultado con GA-1	**Resultado con método tradicional**
$Nro.\ Vueltas\ BT$	$18\ [vueltas]$	$22\ [vueltas]$
$Nro.\ Vueltas\ MT$	$7\ galletas\ con\ 172\ espiras\ cada\ una$ $Bobinadas\ en\ 7\ capas$	$6\ galletas\ con\ 220\ [v]\ cada\ una$ $Bobinadas\ en\ 8\ capas$
$Diámetro\ de\ columna$	$21\ [cm]$	$20\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilización$	$15,5\ [\frac{kVA}{dm^3}]$	$14\ [\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ (Cu)\ 25\ x\ 3\ [mm]$ $(4\ en\ paralelo)$	$Pletina\ (Cu)\ 25\ x\ 12\ [mm]$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ (Cu)\ 2,7\ [mm]$	$Redondo\ (Cu)\ 2,52\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,6\ [T]$	$1,7\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$449\ [L]$	$721\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$108,8\ [dm^3]$	$119,6\ [dm^3]$
$Largo\ cuba$	$116\ [cm]$	$121\ [cm]$
$Ancho\ cuba$	$52\ [cm]$	$50\ [cm]$
$Alto\ cuba$	$91\ [cm]$	$123\ [cm]$
$Aletas$	$43\ aletas\ onduladas/Supf$ $= 17\ [m^2]$	$50\ aletas\ onduladas/Supf$ $= 21,8\ [m^2]$
$Máxima\ sobretemperatura\ aceite$	$54,1\ [°C]$	$56\ [°C]$
$Costo\ materiales$	$8399\ [\$]$	$9545\ [\$]$
$Pérdidas\ cobre$	$4781\ [W]$	$6251\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1074\ [W]$	$1213\ [W]$

Tabla 5.25 - Comparación de diseños obtenidos a partir del algoritmo de optimización desarrollado y por método tradicional de cálculo según [4]. Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista eléctrico, se destaca una diferencia significativa en las pérdidas totales. El modelo tradicional presenta un valor estimado de 7464 W, mientras que el modelo optimizado presenta 5855 W, lo que representa una reducción del 21.6 %. Esta disminución se relaciona con una reducción en la resistencia de los devanados, lograda sin excederse en el costo de conductores.

Se observa una reducción del 12 % en el costo total de materiales. Esta diferencia se debe principalmente a la reducción del volumen de aceite y del núcleo magnético, sin afectar los requisitos de diseño ni los márgenes térmicos y eléctricos.

El cálculo manual no solo resulta menos eficiente, sino que también se aleja de los modelos disponibles en el mercado. Esto refleja el nivel de optimización alcanzado por los fabricantes, logrado mediante múltiples iteraciones físicas (máquinas construidas) y la evaluación directa de sus transformadores.

Desde un enfoque metodológico, las principales ventajas del procedimiento utilizado en esta tesis frente al enfoque tradicional pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Evaluación simultánea de múltiples variables: los algoritmos de optimización permiten evaluar combinaciones de variables de diseño de forma conjunta, identificando configuraciones que minimizan simultáneamente objetivos definidos, como pérdidas y costo de materiales.
- Incorporación directa de restricciones técnicas: el modelo de optimización incluye restricciones físicas y normativas (como densidad de corriente, dimensiones máximas, coeficiente de utilización del núcleo, etc.) que guían el proceso de búsqueda hacia soluciones viables desde el punto de vista constructivo.
- Flexibilidad en los objetivos de diseño: el método permite adaptar la función objetivo a distintos criterios de optimización (económico, energético, térmico), ajustando los coeficientes de ponderación sin necesidad de reformular el modelo completo.
- Reducción de iteraciones manuales: a diferencia del método tradicional, que requiere múltiples ajustes secuenciales por parte del diseñador, el enfoque automatizado permite encontrar configuraciones óptimas en menos tiempo y con menor intervención humana.

6. Breve estudio del impacto ambiental en Mar del Plata

El estudio de impacto ambiental para transformadores de distribución en Mar del Plata es fundamental para cuantificar cómo las mejoras en diseño y materiales contribuyen a la sostenibilidad energética. Al optimizar estos equipos, no solo se reduce el consumo eléctrico y las pérdidas técnicas, sino que también se disminuye la huella de carbono asociada a la generación de energía. Este análisis permitirá evaluar el verdadero beneficio ecológico de implementar transformadores más eficientes, considerando toda su fase operativa.

En este capítulo, se realizará una evaluación cuantitativa que comparará transformadores diseñados a través de un método manual (clásico) con modelos optimizados a través de la herramienta desarrollada, centrándose en dos aspectos clave: la reducción de pérdidas energéticas y las emisiones de CO_2 evitadas Se emplearán datos de operación, factores de emisión locales y estándares internacionales de evaluación.

El objetivo final es proporcionar un marco técnico que respalde decisiones de inversión en infraestructura eléctrica sostenible, demostrando que la optimización de transformadores no sólo es viable económicamente, sino también esencial para cumplir con metas de descarbonización.

6.1. Contexto regulatorio y conceptos ambientales

El ENRE (Ente Nacional Regulador de la Electricidad) es el organismo encargado de regular y fiscalizar el sector eléctrico en Argentina, estableciendo normas técnicas y estándares de eficiencia energética. Entre sus funciones clave se encuentra el monitoreo del **factor de emisión** de CO_2 de la red eléctrica, que representa la cantidad de dióxido de carbono emitido por cada kWh generado . Este indicador es fundamental para evaluar el impacto ambiental del consumo eléctrico y las pérdidas en la red.

La reducción de pérdidas en transformadores de distribución contribuye directamente a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Al optimizar su diseño con la herramienta generada, se reduce la energía desperdiciada en forma de calor, lo que implica menor demanda de generación eléctrica en centrales contaminantes.

A través de la información disponible en la página de CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A.) se obtiene que el factor de emisión en Argentina oscila, mes a mes, entre los valores $0,41\ [\frac{ton\ de\ CO_2}{MWh}]$ y $0,49\ [\frac{ton\ de\ CO_2}{MWh}]$.

6.2. Cuantificación de impacto ambiental

Para estudiar y calcular el beneficio que trae la herramienta de optimización desarrollada, se debe tener un parámetro de referencia para contrastar. Es así que se comparará un transformador optimizado con esta herramienta con uno calculado por los métodos manuales clásicos en el libro *"Cálculo y construcción de transformadores"* de Dimenna y Stecca.

En dicho libro, se realiza un cálculo sobre una máquina de $630\,[kVA]$ y sólo considerando al cobre como opción de material para los arrollamientos. Se compararán las pérdidas de ese transformador con las de aquellos que diseñó la herramienta desarrollada. En la Tabla 6.1 se muestran las características del transformador diseñado en forma manual en el libro:

$Nro.\ Vueltas\ BT$	$22\ [vueltas]$
$Nro.\ Vueltas\ MT$	$6\ galletas\ con\ 220\ [v]\ cada\ una$ $Bobinadas\ en\ 8\ capas$
$Diámetro\ de\ columna$	$20\ [cm]$
$Coeficiente\ de\ utilizació$	$14\ [\frac{kVA}{dm^3}]$
$Conductor\ BT$	$Pletina\ 25\ x\ 12\ [mm]$
$Conductor\ MT$	$Redondo\ 2,52\ [mm]$
$Inducción\ máxima$	$1,7\ [T]$
$Volumen\ de\ aceite$	$502\ [L]$
$Volumen\ de\ hierro$	$119,6\ [dm^3]$
$Largo\ cuba$	$121\ [cm]$
$Ancho\ cuba$	$50\ [cm]$
$Alto\ cuba$	$123\ [cm]$
$Pérdidas\ conducción$	$6251\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1213\ [W]$

Tabla 6.1 - Características del transformador de 630[kVA] diseñado en "Cálculo y construcción de transformadores" de Dimenna y Stecca

Si se comparan las potencias de pérdidas de este transformador con el diseñado a través de la herramienta de optimización, se puede visualizar el impacto que implica una reducción en las pérdidas a largo plazo.

En la Tabla 6.2 se comparan las pérdidas de los dos modelos a comparar.

	Transformador diseñado en *"Cálculo y construcción de transformadores"* de Dimenna y Stecca	Transformador de cobre diseñado con la herramienta de optimización
$Pérdidas\ conducción$	$6251\ [W]$	$4781\ [W]$
$Pérdidas\ hierro$	$1213\ [W]$	$1074\ [W]$
$Pérdidas\ totales$	$7464\ [W]$	$5855\ [W]$

Tabla 6.2 - Comparación del transformador diseñado en forma manual con el diseñado a través de las herramientas de optimización creadas. Fuente: Elaboración propia

El transformador optimizado logra disminuir las pérdidas totales de la máquina en un 20%. Este margen significativo revela la ineficiencia inherente al diseño manual o clásico de transformadores. En este método de cálculo, las decisiones sobre las variables se fundamentan en su impacto inmediato y evidente en los parámetros del equipo, pero se omite la compleja interdependencia entre ellas, lo que conduce a resultados subóptimos.

Si se toma $0,45\ [\frac{ton\ de\ CO_2}{MWh}]$, que es un valor medio de factor de emisión en función de la información provista en CAMMESA, se puede calcular las emisiones de cada máquina en un año. Se asume un servicio continuo y a plena carga.

$$CO_2\ emitido\ =\ Energía\ generada\ \cdot\ factor\ de\ emisión \tag{6.1}$$

Como se quiere obtener el CO_2 emitido que está asociado a las pérdidas de transformación, numéricamente resulta:

$$Energía\ generada\ =\ Energía\ de\ pérdidas \tag{6.2}$$

En un año:

$$CO_2\ emitido\ =\ Pérdidas\ totales\ \cdot\ 8760\ [horas]\ \cdot\ factor\ de\ emisión \tag{6.3}$$

Para el transformador no optimizado:

$$CO_2\ emitido\ =\ 7464\ [W]\ \cdot\ 8760\ [horas]\ \cdot\frac{1}{1000000}\cdot\ 0,45\ [\frac{ton\ de\ CO_2}{MWh}]$$

$$CO_2\ emitido\ =\ 29,4\ [ton\ de\ CO_2]$$

Para el transformador optimizado:

$$CO_2\ emitido\ =\ 5855\ [W]\ \cdot\ 8760\ [horas]\ \cdot \frac{1}{1000000} \cdot\ 0,45\ [\frac{ton\ de\ CO_2}{MWh}]$$

$$CO_2\ emitido\ =\ 23,1\ [ton\ de\ CO_2]$$

Para transformadores de 630 [kVA] de cobre, cada máquina optimizada implica la emisión de 6,32 toneladas de CO_2 menos por año. Aplicado a 1000 transformadores de distribución son 6320 toneladas de CO_2 menos que se emiten por año. Para visualizar su magnitud, esto equivale a:

- **Hogares:** 6300 toneladas de CO_2 equivalen a las emisiones anuales de aproximadamente 1260 hogares promedio.
- **Automóviles:** Esta cantidad de CO_2 es similar a las emisiones de alrededor de 1370 automóviles de pasajeros conduciendo durante un año.
- **Vuelos transatlánticos:** Un solo vuelo de ida y vuelta entre Buenos Aires y Madrid puede generar 750 toneladas de CO_2 . Por lo tanto, 6300 toneladas equivaldrían a alrededor de 9 vuelos de este tipo.

7. Conclusiones

En este trabajo se aplicaron herramientas de optimización computacional al diseño de transformadores de distribución trifásicos típicos, con el objetivo de minimizar tanto las pérdidas eléctricas como los costos de materiales, considerando además la factibilidad de fabricación. Se desarrolló para ello una herramienta computacional que integra un modelo matemático del transformador —incluyendo relaciones geométricas, eléctricas y restricciones constructivas— junto con un módulo de optimización que permite utilizar tres algoritmos: dos de objetivo único, el Algoritmo Genético (GA) y el Recocido Simulado (SA), y un modelo de optimización multiobjetivo basado en NSGA-II (Algoritmo Genético de Ordenamiento No Dominado II).

Una de las principales conclusiones es que fue posible modelar y resolver el diseño de transformadores como un problema de optimización multiobjetivo, considerando simultáneamente criterios económicos y energéticos. Esta formulación permitió identificar alternativas de diseño técnicamente viables y más eficientes respecto al diseño convencional.

Los tres algoritmos de optimización metaheurística fueron implementados exitosamente en lenguaje Python, lo cual proporcionó flexibilidad para personalizar el modelo según las restricciones específicas del diseño de transformadores, además de facilitar una comparación equitativa entre métodos dentro de un entorno unificado.

Del análisis comparativo se concluye que todas las técnicas utilizadas lograron encontrar soluciones factibles que mejoran el diseño base. Si bien cada algoritmo presentó diferencias en tiempos de convergencia y en la distribución de soluciones, los resultados obtenidos validan la eficacia del uso de metaheurísticas como herramientas robustas para problemas de optimización en ingeniería.

Adicionalmente, el análisis de sensibilidad aplicado a los coeficientes de ponderación de la función objetivo permitió estudiar el efecto del énfasis relativo entre el costo y las pérdidas eléctricas sobre el diseño óptimo. Esta funcionalidad resulta especialmente útil en procesos de toma de decisiones, ya que facilita adaptar el diseño a diferentes prioridades, dependiendo del perfil del fabricante o del usuario final.

Cabe destacar que el presente trabajo se originó en el marco de la asignatura optativa “Transformadores: su Cálculo y Construcción”, lo cual demuestra el valor formativo de dicho curso y su potencial como base para desarrollos aplicados en ingeniería. Se espera que la herramienta desarrollada en esta tesis sirva como complemento didáctico para estudiantes, brindando una plataforma accesible y versátil para validar diseños, explorar alternativas constructivas y comprender la influencia de distintos parámetros en el desempeño del equipo.

Finalmente, como línea de trabajo futura, se propone incorporar criterios ambientales en la función objetivo, así como extender el modelo para incluir transformadores de mayor potencia y diferentes configuraciones constructivas. Asimismo, se plantea analizar la inclusión de materiales alternativos como los vidrios metálicos en el diseño del núcleo, evaluando su impacto en la relación costo-rendimiento. Aunque estos materiales ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia energética, especialmente por sus bajas pérdidas en vacío, su alto costo y las implicancias tecnológicas en el proceso de fabricación podrían limitar su aplicabilidad práctica en transformadores de distribución, por lo que un análisis detallado permitiría valorar su viabilidad en contextos específicos.

Bibliografía: referenciada y consultada

[1] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 5a ed., México: McGraw-Hill, 2012.

[2] J. Corrales, *Cálculo industrial de máquinas eléctricas*, tomo I, Barcelona, España: Marcombo, 1976.

[3] S.K. Singh, N. Mishra, S.K. Awasthi, N. Asthana, A. Srivastava, "Amorphous Core Distribution Transformer with Improved Efficiency and Low Loss for Power Sector Application," Eur. J. Appl. Sc. Eng. Technol., 2024.

[4] Dimenna, Carlos Oscar y Stecca, Juan Carlos, “Cálculo y construcción de Transformadores”, 1era Ed, EUDEM, 2018.

[5] K. Deb, *Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples*, 2nd ed., New Delhi, India: PHI Learning Private Limited, 2012.

[6] Departamento de Matemática, “Notas de clase: Método del Simplex,” Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina, 2018.

[7] Rao, S. S. (2009). Engineering optimization: Theory and practice (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[8] Tetzlaff, T., Gaudiani, A. A., Paredes, A. R., Encinas, D., Fassio, E., Trigila, M., González, R., & Bertaccini, D. (2021). *Metaheurísticas, búsqueda estocástica y cómputo eficiente en optimización aplicada*. XXIII Workshop De Investigadores En Ciencias De La Computación (WICC 2021, Chilecito, La Rioja).

[9] Amoiralis, Eleftherios I., Marina A. Tsili, and Antonios G. Kladas. "Transformer design and optimization: a literature survey." Power Delivery, IEEE Transactions on 24.4 (2009): 1999-2024.

[10] Hui, Li & Li, Han & Bei, He & Shunchang, Yang. (2001). Application research based on improved genetic algorithms for optimum design of power transformers. 1. 242 - 245 vol.1.

[11] M. Y. Abu-Sada, Cost effective design of conventional type distribution transformer using optimization techniques. Diss. King Fahd University of Petroleum and Minerals, 2004.

[12] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, Transformer Design Principles-With Application to Core-Form Power Transformers, Gordon and Breach Science Publishers, Canada, 2001.

[13] J. Böhm, T. Dittmar, M. Möller, D. Niehoff, A. Gasser, y A. Olowinsky, “Seam Properties of Overlap Welding Strategies from Copper to Aluminum Using Green

Laser Radiation for Battery Tab Connections in Electric Vehicles," *Metals*, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, 2023.

[14] Tubos Trans Electric, "Catálogo Transformadores de distribución" [En línea]. Disponible en: https://www.tte.com.ar/web2022/pdf/OrigCompactocs.pdf

[15] Alfanar, "Distribution transformers" [En línea]. Disponible en: https://www.alfanar.com/catalogs/transformers/Distribution_oil_transformer.pdf

[16] Olivares-Galván, J.C., de León F., Georgilakis, P.S., Escarela-Pérez, R., "Selection of copper against aluminium windings for distribution transformers" IET Electric Power Applications, 2009.

[17] Maussion, P., Picot, A., Chabert, M., & Malec, D. (2015, March). Lifespan and aging modeling methods for insulation systems in electrical machines: A survey. In Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2015 IEEE Workshop on (pp. 279-288). IEEE.

[18] K.R.M Nair, "Power and Distribution Transformers Practical Design Guide", Londres, Taylor & Francis Group, 2021.

Anexos

Anexo 1: Variables definidas en script y función de evaluación

Nombre de la Variable	Descripción
POT_NOM	Potencia nominal del transformador en kVA.
U_MT	Tensión de entrada en kV (Conexión en triángulo).
U_BT	Tensión de salida en kV (Conexión en estrella).
Frecuencia	Frecuencia de la red eléctrica en Hz.
k	Distancia entre bobinado secundario y columna (en mm).
j	Distancia entre bobinas de secundario y primario (en mm).
m	Grosor del tubo entre el secundario y el núcleo (en mm).
l	Grosor del tubo entre el secundario y el primario (en mm).
p	Distancia entre la bobina de MT y la columna sucesiva (en mm).
o	Distancia axial desde el final del BT al yugo (en mm).

n	Distancia axial desde el final de MT al yugo (en mm).
g	Distancia entre la bobina de MT y la cuba (en mm).
UfBT	Tensión de fase del bobinado de Baja Tensión en kV.
IfBT	Corriente de fase del bobinado de Baja Tensión en kA.
IfMT	Corriente de fase del bobinado de Media Tensión en kA.
secciones_PletinasCobre	Lista de secciones de pletinas de cobre disponibles (índice, ancho, espesor, número de conductores en paralelo).
Secciones_ConductorRedondo	Lista de secciones de conductor redondo disponibles (índice, diámetro, sección, número de conductores en paralelo).
tamanos_tiras	Lista de anchos de las tiras de acero-grano orientado disponibles (en cm).
num_pasos	Número de pasos para la configuración de la columna del núcleo.
DensidadCobre	Densidad del cobre en kg/mm³.
DensidadAluminio	Densidad del aluminio en kg/mm³.
DensidadHierro	Densidad del hierro en kg/cm³.
DensidadPrespan	Densidad del prespan en g/cm³.

ResistividadCobre	Resistividad del cobre en Ohm*mm²/m.
ResistividadAluminio	Resistividad del aluminio en Ohm*mm²/m.
PrecioCobre	Precio del cobre en $/kg.
PrecioAluminio	Precio del aluminio en $/kg.
Precio_Fe	Precio del hierro en $/kg.
PrecioAceite	Precio del aceite aislante en $/L.
PrecioPrespan	Precio del prespan en $/g.
PrecioPerdidasCarga	Precio de las pérdidas de carga en $/kWh.

Variables Usadas en la Función evaluar_cromosoma

cromosoma	Lista de variables de diseño del transformador que representa una solución candidata.
current_generation	Número de la generación actual en el algoritmo genético.
total_generations	Número total de generaciones en el algoritmo genético.
NroVueltasBT	Número de vueltas del bobinado de Baja Tensión.
D_Columnas	Diámetro de las columnas del núcleo en cm.
CoefUt	Coeficiente de utilización del núcleo

SeccionBT	Tupla que representa la sección de las pletinas de cobre del bobinado de Baja Tensión.
SeccionMT	Tupla que representa la sección del conductor redondo del bobinado de Media Tensión.
InduccionMax	Inducción magnética máxima en el núcleo en Tesla.
CantidadParalelos	Cantidad de conductores en paralelo en el bobinado de BT (calculado).
mejor_combinacion	Tupla con la mejor combinación de tamaños de tiras para el núcleo.
mejores_alturas	Lista con las alturas correspondientes a la mejor combinación de tiras.
mejor_area	Área efectiva máxima del núcleo obtenida con la mejor combinación de tiras en cm^2.
factor_utilizacion	Factor de utilización del área del núcleo (adimensional).
Densidad_MT	Densidad del material del bobinado de Media Tensión (cobre o aluminio) en kg/mm^3.
Precio_MT	Precio del material del bobinado de Media Tensión (cobre o aluminio) en $/kg.
Resistividad_MT	Resistividad del material del bobinado de Media Tensión (cobre o aluminio) en $Ohm*mm^2/m$.
Densidad_BT	Densidad del material del bobinado de Baja Tensión (cobre o aluminio) en kg/mm^3.

Precio_BT	Precio del material del bobinado de Baja Tensión (cobre o aluminio) en $/kg.
Resistividad_BT	Resistividad del material del bobinado de Baja Tensión (cobre o aluminio) en Ohm*mm²/m.
NroVueltasMT	Número de vueltas del bobinado de Media Tensión.
AlturaBT	Altura del devanado de Baja Tensión en mm.
L_Columnas	Longitud de las columnas del núcleo en cm.
Capas_BT	Número de capas en el devanado de Baja Tensión.
Dint_BT	Diámetro interior del arrollamiento de Baja Tensión en mm.
Apilado_BT	Profundidad radial del arrollamiento de Baja Tensión en mm.
LM_BT	Longitud media total del arrollamiento de Baja Tensión en mm.
Peso_BT	Peso del devanado de Baja Tensión en kg.
CargaLineal_BT	Carga lineal del bobinado de Baja Tensión en A/mm.
CargaAdmisible_BT	Carga admisible del bobinado de Baja Tensión en A/mm.
Resistencia_BT20	Resistencia de las 3 fases del bobinado de Baja Tensión a 20 grados Celsius en Ohm.

Resistencia_BT	Resistencia de las 3 fases del bobinado de Baja Tensión a la temperatura de funcionamiento en Ohm.
P_Cond_BT	Pérdidas en el cobre del bobinado de Baja Tensión en Watt.
EspirasPorGalleta	Cantidad de espiras por galleta en el bobinado de Media Tensión.
GalletasNecesarias	Número de galletas necesarias para el bobinado de Media Tensión.
AlturaGalleta	Altura de cada galleta en el bobinado de Media Tensión en mm.
CantidadCapas	Cantidad de capas en el devanado de Media Tensión.
Apilado_MT	Profundidad radial del arrollamiento de Media Tensión en mm.
LM_MT	Longitud media total del arrollamiento de Media Tensión en mm.
CargaLineal_MT	Carga lineal del bobinado de Media Tensión en A/mm.
AnchoVentana	Ancho de la ventana del núcleo en cm.
L_Yugo	Longitud del yugo del núcleo en cm.
Vol_Fe	Volumen del núcleo de hierro en cm^3.
CostoMat_Fe	Costo del material del núcleo de hierro en $.

P_Fe	Pérdidas en el hierro del núcleo en Watt.
CargaAdmisible_MT	Carga admisible del bobinado de Media Tensión en A/mm.
Resistencia_MT20	Resistencia de las 3 fases del bobinado de Media Tensión a 20 grados Celsius en Ohm.
Resistencia_MT	Resistencia de las 3 fases del bobinado de Media Tensión a la temperatura de funcionamiento en Ohm.
P_Cond_MT	Pérdidas en el cobre del bobinado de Media Tensión en Watt.
Peso_MT	Peso del devanado de Media Tensión en kg.
L_Cuba	Largo de la cuba del transformador en cm.
W_Cuba	Ancho de la cuba del transformador en cm.
h_Cuba	Altura de la cuba del transformador en cm.
TempAceiteMedia	Temperatura media del aceite aislante en grados Celsius.
TempCuba	Temperatura de la cuba del transformador en grados Celsius.
SupMin	Superficie mínima requerida para la refrigeración en m².
SupAletas	Superficie de las aletas del radiador en m².
VolAletas	Volumen de aceite en las aletas del radiador en cm³.

VolPerfiles	Volumen de los perfiles estructurales de la cuba en cm³.
VolPrespan	Volumen estimado del material aislante prespan en cm³.
VolAislantes	Volumen estimado de otros materiales aislantes en cm³.
VolAceite	Volumen total del aceite aislante en litros.
CostoMat_Cond	Costo total del material conductor (cobre o aluminio) en $.
CostoMat_Total	Costo total de los materiales principales del transformador en $.
P_Cond_Total	Pérdidas totales en el cobre (BT + MT) en Watt.
FuncObjetivo	Valor de la función objetivo a minimizar (costo total ponderado).

Anexo 2: Código Algoritmo Genético (GA)

```
# ALGORITMO GENÉTICO OBJETIVO SIMPLE
Optimización del diseño de transformadores
Autores: Flamini Marczuk y Sainz
Fecha:Febrero 2025
import numpy as np
from itertools import product
import random
import math
import csv
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Definimos los parámetros dados (constantes conocidas)
POT_NOM = 630  # Potencia nominal del transformador en kVA
U_MT = 13.2   # Tensión de entrada en kV (Conexión en triángulo)
U_BT = 0.4     # Tensión de salida en kV(Conexión en estrella)
FRECUENCIA = 50  # Frecuencia en Hz

# Cálculo de distancias aislantes y eléctricas a respetar
k = 8  # Distancia entre bobinado secundario y columna
j = (0.0019)*(U_MT**2) + 0.4782*U_MT + 0.9632  # Distancia entre bobinas de
secundario y primario
m = 1.5    # Grosor tubo entre secundario y nucleo
l = (-0.0002)*(U_MT**2) + 0.1808*U_MT - 0.2141  # Grosor tubo entre secundario
y primario
p = 0.8593*(U_MT) + 0.1083  # Distancia entre bobina de MT y columna sucesiva
o = 10  # Distancia axial desde el final del BT al yugo
n = 0.0033*(U_MT**2) + 1.331*U_MT + 2.8621  # Distancia axial desde el final de
MT al yugo
g = (20*U_MT/9) + (20/9)  # Distancia entre bobina de MT y la cuba

# Cálculo de corrientes y tensiones necesarias
UfBT = U_BT / (3**0.5)
IfBT = (POT_NOM) / (3 * UfBT)
IfMT = (POT_NOM) / (3 * U_MT)

# Secciones de pletinas de cobre disponibles
secciones_PletinasCobre = [
    (1, 10, 2.0, 1), (2, 12, 2.0, 1),...
]

Secciones_ConductorRedondo = [
    (1, 2.4, 4.5239, 1), (2, 2.5, 4.9088, 1), …
]

# Tiras de acero-grano orientado disponibles
tamanos_tiras = [0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4,...]
num_pasos = 4  # Número de pasos

# Constantes útiles
DensidadCobre = 0.000008930  # kg/mm3
DensidadAluminio = 0.000002710  # kg/mm3
DensidadHierro = 0.00765  # kg/cm3
DensidadPrespan = 1.2  # g/cm3
ResistividadCobre = 0.0175  # Ohm*mm2/m
ResistividadAluminio = 0.0282  # Ohm*mm2/m
PrecioCobre = 10.16  # $/kg
PrecioAluminio = 2.7  # $/kg
Precio_Fe = 2  # $/kg
PrecioAceite = 8  # $/L
PrecioPrespan = 0.022  # $/g
PrecioPerdidasCarga = 0.0683  # $/kWh

def ConfiguracionColumna(D_columnas, tamanos_tiras, num_pasos):
```

```
    """Encuentra la mejor configuración de tiras para cubrir el núcleo con la
máxima área efectiva."""
    R = D_columnas / 2  # Convertir el diámetro del núcleo a radio

    def calcular_alturas_y_area(tiras):
        alturas = []
        suma_alturas_previas = 0
        area_cubierta = 0

        for i, tamano_tira in enumerate(tiras):
            if tamano_tira > R:
                return (None, None)  # Tamaño de la tira es demasiado grande

            # Calcular la altura de la tira actual
            if i == 0:
                hn = np.sqrt(R**2 - tamano_tira**2)
            else:
                hn = np.sqrt(R**2 - tamano_tira**2) - suma_alturas_previas

            if hn < 0:
                return (None, None)  # La tira no encaja

            suma_alturas_previas += hn
            alturas.append(hn)
            area_cubierta += tamano_tira * hn

        area_efectiva = 4 * area_cubierta
        return (alturas, area_efectiva)

    # Generar todas las combinaciones posibles de tamaños de tiras
    todas_combinaciones = product(tamanos_tiras, repeat=num_pasos)

    mejor_combinacion = None
    mejor_area = 0
    mejores_alturas = None

    for combinacion in todas_combinaciones:
        alturas, area = calcular_alturas_y_area(combinacion)
        if alturas is not None and area > mejor_area:
            mejor_area = area
            mejor_combinacion = combinacion
            mejores_alturas = alturas

    # Calcular el factor de utilización
    if mejor_combinacion:
        factor_utilizacion = mejor_area / (np.pi * R * R)
                    return   mejor_combinacion,   mejores_alturas,   mejor_area,
factor_utilizacion
    else:
        return None, None, 0, 0

def CumpleDensidadCorrienteMT(seccion):
    area = seccion[2]
```

```
    densidad_corriente = IfMT / area
    return 1.5 <= densidad_corriente <= 3.5

def CumpleDensidadCorrienteBT(seccion):
    area = seccion[1] * seccion[2]
    densidad_corriente = IfBT / area
    return 1.5 <= densidad_corriente <= 3.5

def generar_cromosoma():
        """Genera un cromosoma aleatorio con variables de diseño del
transformador."""
    NroVueltasBT = random.randint()
    D_Columnas = math.ceil(random.uniform(4 * ((POT_NOM**0.5)**0.5)-8, 4 *
((POT_NOM**0.5)**0.5)+5))
    SeccionBT = random.choice(secciones_PletinasCobre)
    SeccionMT = random.choice(Secciones_ConductorRedondo)
    InduccionMax = random.uniform(1.6, 1.7)
    CoefUt = random.uniform(6, 16)
       cromosoma = [NroVueltasBT, D_Columnas, CoefUt, SeccionBT, SeccionMT,
InduccionMax]
    return cromosoma

def verificar_restricciones(cromosoma):
    """Verifica si el cromosoma cumple con las restricciones."""
      NroVueltasBT, D_Columnas, CoefUt, SeccionBT, SeccionMT, InduccionMax =
cromosoma

    # Restricción 1: Densidad de corriente
    if SeccionBT[3] == 1:
        area_BT = SeccionBT[1] * SeccionBT[2] * 4  # Área en mm²
    else:
        area_BT = SeccionBT[1] * SeccionBT[2] * 4

    area_MT = SeccionMT[2]  # Área en mm²
    densidad_corriente_BT = IfBT / (area_BT)
    densidad_corriente_MT = IfMT / (area_MT)

    if SeccionBT[3] == 1:
        if not (1.5 <= densidad_corriente_BT <= 3.5):
            return False
    else:
        if not (0.5 <= densidad_corriente_BT <= 1.5):
            return False

    if SeccionMT[3] == 1:
        if not (1.5 <= densidad_corriente_MT <= 3.5):
            return False
    else:
        if not (0.5 <= densidad_corriente_MT <= 1.5):
            return False

    # Restricción 2: Coeficiente de utilización núcleo
    if not (6 <= CoefUt <= 16):
```

```
        return False

    return True

def evaluar_cromosoma(cromosoma, current_generation=None,
total_generations=None):
    if not verificar_restricciones(cromosoma):
        return -float('inf')

    # Explotar al cromosoma en sus 6 genes
      NroVueltasBT, D_Columnas, CoefUt, SeccionBT, SeccionMT, InduccionMax =
cromosoma

    if SeccionBT[3] == 2:
        CantidadParalelos = 1
        while CantidadParalelos <= 4:
            area_BT = SeccionBT[1] * SeccionBT[2] * CantidadParalelos
            densidad_corrienteBT = IfBT / area_BT
            if 0.5 <= densidad_corrienteBT <= 1.5:
                break
            CantidadParalelos += 1
    else:
        CantidadParalelos = 1
        while CantidadParalelos <= 4:
            area_BT = SeccionBT[1] * SeccionBT[2] * CantidadParalelos
            densidad_corrienteBT = IfBT / area_BT
            if 1.5 <= densidad_corrienteBT <= 3.5:
                break
            CantidadParalelos += 1

    # Análisis de la configuración de columna
       mejor_combinacion, mejores_alturas, mejor_area, factor_utilizacion =
ConfiguracionColumna(
         D_Columnas, [0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,
15], 4
    )

    if SeccionMT[3] == 1:
        Densidad_MT = DensidadCobre
        Precio_MT = PrecioCobre
        Resistividad_MT = ResistividadCobre
    else:
        Densidad_MT = DensidadAluminio
        Precio_MT = PrecioAluminio
        Resistividad_MT = ResistividadAluminio

    if SeccionBT[3] == 1:
        Densidad_BT = DensidadCobre
        Precio_BT = PrecioCobre
        Resistividad_BT = ResistividadCobre
    else:
        Densidad_BT = DensidadAluminio
        Precio_BT = PrecioAluminio
```

```
        Resistividad_BT = ResistividadAluminio

                                                if          NroVueltasBT          <
math.ceil((220*2250/(50*InduccionMax*0.64*D_Columnas*D_Columnas))-5):
        return -float('inf')

    NroVueltasMT = math.floor(NroVueltasBT * (1.05*U_MT * (3**0.5) / U_BT))
    AlturaBT = NroVueltasBT * (SeccionBT[1]) + 2 * (NroVueltasBT)*0.6
              L_Columnas    =    max(((AlturaBT    +    2    *    o)    /    10),
(POT_NOM/3)/(CoefUt*0.64*D_Columnas*D_Columnas*(1/1000)))
    Capas_BT = CantidadParalelos
    Dint_BT = D_Columnas * 10 + (2 * (k + m))
    Apilado_BT = Capas_BT*SeccionBT[2] + (Capas_BT-1)*0.6 + 2 * 0.6
    LM_BT = NroVueltasBT * 3.14 * (Dint_BT + 2 * Apilado_BT)
       Peso_BT  =  3  *  Densidad_BT  *  LM_BT  *  SeccionBT[1]  *  SeccionBT[2]  *
CantidadParalelos
    CargaLineal_BT = (NroVueltasBT * IfBT) / (AlturaBT/10)
    CargaAdmisible_BT = (5800 / 9.6) * ((Apilado_BT / (AlturaBT)) - 0.6) + 1600

    # Penalización por sobrecarga de corriente (BT)
    if CargaLineal_BT > CargaAdmisible_BT:
        return -float('inf')

     Resistencia_BT20 = 3 * Resistividad_BT * LM_BT / (1000 * (SeccionBT[1] *
SeccionBT[2] * CantidadParalelos))
     Resistencia_BT = Resistencia_BT20 * (1 + 0.00393 * (55 * (CargaLineal_BT /
CargaAdmisible_BT) - 20))
    P_Cond_BT = Resistencia_BT * IfBT * IfBT

    EspirasPorGalleta = 2000 // (U_MT * 1000 / NroVueltasMT)
    GalletasNecesarias = math.ceil(NroVueltasMT / EspirasPorGalleta)
    AlturaGalleta = ((L_Columnas * 10 - (GalletasNecesarias - 1) * 10 - 2 * n))
/ GalletasNecesarias
         CantidadCapas   =   math.floor((NroVueltasMT   /   GalletasNecesarias)   /
(AlturaGalleta / SeccionMT[1]))
     Apilado_MT = j + l + CantidadCapas * SeccionMT[1] + ((CantidadCapas / 2) -
1) * 5 + ((CantidadCapas / 2) + 1) * 0.25 + 2
    LM_MT = 3.14 * (Dint_BT + 2 * Apilado_BT + Apilado_MT) * NroVueltasMT
    CargaLineal_MT = (EspirasPorGalleta * IfMT) / (AlturaGalleta / 10)
     AnchoVentana = max((2 * (Apilado_BT + m + k + Apilado_MT) + p) / 10, (0.32
* L_Columnas + 0.06 * D_Columnas))
    L_Yugo = 2 * D_Columnas + 2 * AnchoVentana + 0.906 * D_Columnas
    Vol_Fe = 3 * mejor_area * L_Columnas + 2 * 1.1 * mejor_area * L_Yugo
    CostoMat_Fe = Vol_Fe * DensidadHierro * Precio_Fe

    # Cálculo de pérdidas
    P_Fe = math.exp((InduccionMax - 1.5) / 0.3925) * Vol_Fe * DensidadHierro
    if P_Fe > 1450:
        return -float('inf')
     CargaAdmisible_MT = (5800 / 9.6) * ((Apilado_MT / AlturaGalleta) - 0.6) +
1600
    if CargaLineal_MT > CargaAdmisible_MT:
        return -float('inf')
```

```
    SobreelevacionT_BT = (CargaLineal_BT / CargaAdmisible_BT) * 55
    SobreelevacionT_MT = (CargaLineal_MT / CargaAdmisible_MT) * 55
    Resistencia_MT20 = 3 * Resistividad_MT * LM_MT / (1000 * (SeccionMT[2]))
     Resistencia_MT = Resistencia_MT20 * (1 + 0.00393 * (55 * (CargaLineal_MT / 
CargaAdmisible_MT) - 20))
    P_Cond_MT = Resistencia_MT * IfMT * IfMT
    Peso_MT = 3 * Densidad_MT * LM_MT * SeccionMT[2]

    # Dimensiones cuba
    L_Cuba = L_Yugo + (2 * (Apilado_BT + m + k + Apilado_MT + g) / 10)
    W_Cuba = D_Columnas + (2 * (Apilado_BT + Apilado_MT + m + k + g) / 10) + 10
    h_Cuba = L_Columnas + 2 * g / 10 + 25 + 10
    TempAceiteMedia = 0.85 * 55
    TempCuba = TempAceiteMedia - 8
    SupMin = (P_Cond_BT + P_Cond_MT + P_Fe) / (13.4 * TempCuba)
    SupAletas = SupMin - ((2 * (L_Cuba * h_Cuba + W_Cuba * h_Cuba)) / 10000
    if SupAletas < 0:
        SupAletas = 0
    else:
          SupAletas = SupMin - ((2 * (L_Cuba * h_Cuba + W_Cuba * h_Cuba)) / 
10000)
    SupRealAletas = 0.437 * (h_Cuba / 100)
     SobreTempMaxAceite = (((P_Cond_BT + P_Cond_MT + P_Fe) / SupRealAletas) / 
350) * 55
    CantidadAletas = 1
    while SobreTempMaxAceite > 55:
        CantidadAletas += 1
        SupRealAletas = 0.437 * (h_Cuba / 100) * CantidadAletas
         SobreTempMaxAceite = (((P_Cond_BT + P_Cond_MT + P_Fe) / SupRealAletas) 
/ 350) * 55

    VolAletas = (SupRealAletas / 0.437) * 2.6 * 1000
    VolPerfiles = 4 * (L_Cuba - 10) * 0.17
       VolPrespan = 0.3 * ((Peso_BT / Densidad_BT) / 1000 + (Peso_MT / 
Densidad_MT) / 1000)
    VolAislantes = 0.3 * (Vol_Fe + VolPerfiles + (Peso_BT / Densidad_BT) / 1000 
+ (Peso_MT / Densidad_MT) / 1000)
     VolAceite = ((L_Cuba * W_Cuba * h_Cuba) + VolAletas - Vol_Fe - (Peso_BT / 
Densidad_BT) / 1000 - (Peso_MT / Densidad_MT) / 1000 - VolAislantes - 
VolPerfiles) / 1000
    CostoMat_Cond = Peso_BT * Precio_BT + Peso_MT * Precio_MT
     CostoMat_Total = CostoMat_Cond + CostoMat_Fe + VolAceite * PrecioAceite + 
VolPrespan * PrecioPrespan * DensidadPrespan
    P_Cond_Total = P_Cond_BT + P_Cond_MT
     FuncObjetivo = (((P_Cond_Total + P_Fe) * PrecioPerdidasCarga * 50 * 365 * 
24) / 1000) + 5 * CostoMat_Total

    return FuncObjetivo

def mutacion_dos_genes(cromosoma):
       """Muta DOS genes de forma suave, con sesgo entre NroVueltasBT y 
D_Columnas."""
```

```
    cromosoma_mutado = list(cromosoma)
    gen_indices = list(range(len(cromosoma)))

    # Seleccionar el primer gen al azar
    gen1_index = random.choice(gen_indices)
    gen_indices.remove(gen1_index)

    # Sesgo para NroVueltasBT y D_Columnas
    if gen1_index == 0:  # NroVueltasBT
        peso = [10 if i == 1 else 1 for i in gen_indices]
    elif gen1_index == 1:  # D_Columnas
        peso = [10 if i == 0 else 1 for i in gen_indices]
    else:
        peso = [1 for _ in gen_indices]

    # Seleccionar el segundo gen con probabilidad sesgada
    gen2_index = random.choices(gen_indices, weights=peso, k=1)[0]

    # Mutar ambos genes seleccionados
    for gen_index in [gen1_index, gen2_index]:
        valor_original = cromosoma[gen_index]
        if gen_index == 0:  # NroVueltasBT
            delta = random.uniform(-1, 1)
            valor_nuevo = round(valor_original + delta)
        elif gen_index == 1:  # D_Columnas
            delta = random.uniform(-2, 2)
            valor_nuevo = math.floor(valor_original + delta)
        elif gen_index == 2:  # CoefUt
            delta = random.uniform(-1, 1)
            valor_nuevo = max(6, min(16.0, round(valor_original + delta, 3)))
        elif gen_index == 5:  # InduccionMax
            delta = random.uniform(-0.5, 0.5)
            valor_nuevo = max(1.6, min(1.7, round(valor_original + delta, 3)))
        elif gen_index == 3:  # SeccionBT
            valor_nuevo = valor_original
            attempts = 0
            while attempts < 5:
                candidate = random.choice(secciones_PletinasCobre)
                                    if candidate != valor_original and
CumpleDensidadCorrienteBT(candidate):
                    valor_nuevo = candidate
                    break
                attempts += 1
        elif gen_index == 4:  # SeccionMT
            valor_nuevo = valor_nuevo
            attempts = 0
            while attempts < 5:
                candidate = random.choice(Secciones_ConductorRedondo)
                                    if candidate != valor_original and
CumpleDensidadCorrienteMT(candidate):
                    valor_nuevo = candidate
                    break
                attempts += 1
```

```
        cromosoma_mutado[gen_index] = valor_nuevo

    return tuple(cromosoma_mutado)

def mutacion_un_gen(cromosoma):
    """Muta UN gen de forma suave y devuelve al cromosoma mutado."""
    cromosoma_mutado = list(cromosoma)
    Excluidos = {3, 4}
    gen_index = random.randint(0, len(cromosoma) - 1)
    while gen_index in Excluidos:
        gen_index = random.randint(0, len(cromosoma) - 1)

    valor_original = cromosoma[gen_index]
    if gen_index == 0:  # NroVueltasBT
        delta = random.uniform(-1, 1)
        valor_nuevo =round(valor_original + delta)
    elif gen_index == 1:  # D_Columnas
        delta = random.uniform(-2, 2)
        valor_nuevo = math.floor(valor_original + delta)
    elif gen_index == 2:  # CoefUt
        delta = random.uniform(-1, 1)
        valor_nuevo = max(6, min(16.0, round(valor_original + delta, 3)))
    elif gen_index == 5:  # InduccionMax
        delta = random.uniform(-0.5, 0.5)
        valor_nuevo = max(1.6, min(1.7, round(valor_original + delta, 3)))
    elif gen_index == 3:  # SeccionBT
        valor_nuevo = valor_original
        attempts = 0
        while attempts < 5:
            candidate = random.choice(secciones_PletinasCobre)
                                    if   candidate   !=   valor_original   and
CumpleDdensidadCorrienteBT(candidate):
                valor_nuevo = candidate
                break
            attempts += 1
    elif gen_index == 4:  # SeccionMT
        valor_nuevo = valor_original
        attempts = 0
        while attempts < 5:
            candidate = random.choice(Secciones_ConductorRedondo)
                                    if   candidate   !=   valor_original   and
CumpleDensidadCorrienteMT(candidate):
                valor_nuevo = candidate
                break
            attempts += 1
    cromosoma_mutado[gen_index] = valor_nuevo
    return tuple(cromosoma_mutado)

def tiene_al_menos_dos_validos(poblacion):
      """Verifica si la población tiene al menos dos cromosomas con fitness
válido."""
    validos = 0
    for cromosoma in poblacion:
```

```
        if verificar_restricciones(cromosoma):
            try:
                fitness = evaluar_cromosoma(cromosoma)
                if fitness != -float('inf') and fitness > 0:
                    validos += 1
                    if validos >= 2:
                        return True
            except:
                continue
    return False

def crossover(padre1, padre2):
    """Cruce uniforme"""
    hijo = []
    for i in range(len(padre1)):
        if random.random() < 0.5:
            hijo.append(padre1[i])
        else:
            hijo.append(padre2[i])
    return tuple(hijo)



def algoritmo_genetico(poblacion_size=12, generaciones=200):

    poblacion = [generar_cromosoma() for _ in range(poblacion_size)]

    # Verificar que existan dos soluciones válidas
    validos = 0
    for cromosoma in poblacion:
        if verificar_restricciones(cromosoma):
            try:
                fitness = evaluar_cromosoma(cromosoma)
                if fitness != -float('inf') and fitness > 0:
                    validos += 1
                    if validos >= 2:
                        break
            except:
                continue

    # Si no hay suficiente soluciones válidas, crear nuevas
    while validos < 2:
            poblacion = [solution1, solution2] + [generar_cromosoma() for _ in
range(poblacion_size-2)]
        validos = 0
        for cromosoma in poblacion:
            if verificar_restricciones(cromosoma):
                try:
                    fitness = evaluar_cromosoma(cromosoma)
                    if fitness != -float('inf') and fitness > 0:
                        validos += 1
                        if validos >= 2:
                            break
```

```
                except:
                    continue

    mejor_cromosoma_global = None
    mejor_objetivo_global = float('inf')
    generacion_mejor_solucion = 0
    todos_objetivos_por_generacion = []
    mejores_objetivos_por_generacion = []

    for generacion in range(generaciones):
                fitness_poblacion = [(cromosoma, evaluar_cromosoma(cromosoma,
generacion, generaciones)) for cromosoma in poblacion]
        valid_fitness = [f for f in fitness_poblacion if f[1] > 0]

        if not valid_fitness:
            break

        fitness_poblacion = valid_fitness
        fitness_poblacion.sort(key=lambda x: x[1], reverse=False)
                    mejor_cromosoma_generacion, mejor_objetivo_generacion =
min(fitness_poblacion, key=lambda x: x[1])

        if mejor_objetivo_generacion < mejor_objetivo_global:
            mejor_cromosoma_global = mejor_cromosoma_generacion
            mejor_objetivo_global = mejor_objetivo_generacion
            generacion_mejor_solucion = generacion + 1

        # Guardar datos para gráficos
        objetivos_generacion = [obj for _, obj in valid_fitness]
                    todos_objetivos_por_generacion.append((generacion + 1,
objetivos_generacion))
                    mejores_objetivos_por_generacion.append((generacion + 1,
mejor_objetivo_generacion))

        num_elites = 2
        num_elites = min(num_elites, len(valid_fitness))
        elites = [cromosoma for cromosoma, _ in fitness_poblacion[:num_elites]]
        nueva_poblacion = elites.copy()
        mitad_poblacion = poblacion_size // 2

        # Elegir tipo de mutación
        if generacion < generaciones // 2:
            mutacion = mutacion_dos_genes
        else:
            mutacion = mutacion_un_gen

        # Generar mitad de población mutando elites
        for _ in range(mitad_poblacion - num_elites):
            elite_padre = random.choice(elites)
            clon = list(elite_padre)
            mutado = mutacion(clon)
            nueva_poblacion.append(mutado)
```

```
        # Generar otra mitad mediante crossover
        padres_validos = [cromosoma for cromosoma, _ in valid_fitness]
        crossover_half = []
        for _ in range(mitad_poblacion):
            if len(padres_validos) >= 2:
                padre1, padre2 = random.sample(padres_validos, 2)
                hijo = crossover(padre1, padre2)
                crossover_half.append(hijo)
            else:
                crossover_half.append(generar_cromosoma())
        nueva_poblacion += crossover_half
        poblacion = nueva_poblacion[:poblacion_size]

    # Escape a población inicial si no encuentra solución
    if mejor_cromosoma_global is None:
        fitness_inicial = [(c, evaluar_cromosoma(c)) for c in poblacion]
        fitness_inicial = [f for f in fitness_inicial if f[1] > 0]
        if fitness_inicial:
                            mejor_cromosoma_global,  mejor_objetivo_global  =
min(fitness_inicial, key=lambda x: x[1])
            generacion_mejor_solucion = 0

    # Plotting
    if todos_objetivos_por_generacion and mejores_objetivos_por_generacion:
        plt.figure(figsize=(15, 6))
        plt.subplot(1, 2, 1)
        for generacion, objetivos in todos_objetivos_por_generacion:
                        plt.scatter([generacion]  *  len(objetivos),  objetivos,
color='purple', alpha=0.6)
        plt.xlabel('Número de Generación')
        plt.ylabel('Función Objetivo [$]')
        plt.title('Todos los Cromosomas Válidos por Generación')
        plt.grid(True)

        plt.subplot(1, 2, 2)
                            generaciones_nums   =   [gen   for   gen,   _   in
mejores_objetivos_por_generacion]
                            mejores_objetivos   =   [obj   for   _,   obj   in
mejores_objetivos_por_generacion]
            plt.plot(generaciones_nums, mejores_objetivos, 'b-o', linewidth=2,
markersize=5)
        plt.xlabel('Número de Generación')
        plt.ylabel('Mejor Función Objetivo [$]')
        plt.title('Mejor Solución por Generación')
        plt.grid(True)
        plt.tight_layout()
        plt.show()

    with open("results.csv", "w", newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        writer.writerow(["Generation", "Objective Value"])
        for generacion, objetivos in todos_objetivos_por_generacion:
            writer.writerows([generacion, objetivo] for objetivo in objetivos)
```

```
                return mejor_cromosoma_global, mejor_objetivo_global,
generacion_mejor_solucion

# Ejecutar algoritmo
mejor_solucion, mejor_objetivo, generacion_mejor = algoritmo_genetico()
```

Anexo 3: Código Simulated Annealing (SA)

```
# ALGORITMO SIMULATED ANNEALING
Optimización del diseño de transformadores
Autores: Flamini Marczuk y Sainz
Fecha:Marzo 2025
def simulated_annealing(temp_inicial, cooling_rate, iteracionesMax):
    # Generar un cromosoma inicial válido
    solucion_actual = generar_cromosoma()
    while True:
        if verificar_restricciones(solucion_actual):
            energia_actual = evaluar_cromosoma(solucion_actual)
            if energia_actual != float('inf'):  # Verificar que sea válido
                break
        solucion_actual = generar_cromosoma()

    energia_actual = evaluar_cromosoma(solucion_actual)
    mejor_solucion = solucion_actual
    mejor_energia = energia_actual

    # Listas para almacenar datos para gráficos y CSV
    temperaturas = []
    energias = []
    mejor_energias = []
    iteraciones = []
    energias_validas = []  # Almacena todas las energías válidas

    for iteracion in range(iteracionesMax):
        temperatura = temp_inicial * (cooling_rate ** iteracion)
        temperaturas.append(temperature)
        energias.append(energia_actual)
        mejor_energias.append(mejor_energia)
        iteraciones.append(iteracion)
        energias_validas.append((iteracion, energia_actual))

        # Decidir qué función de mutación usar
        if iteracion < 0.5 * iteracionesMax:  # Primera mitad de iteraciones
            mutacion = mutacion_dos_genes
        else:  # Segunda mitad de iteraciones
```

```
            mutacion = mutacion_un_gen

        # Generar vecino con mutación seleccionada
        solucion_vecina = mutacion(solucion_actual)
        while not verificar_restricciones(solucion_vecina):
            solucion_vecina = mutacion(solucion_actual)

        energia_vecina = evaluar_cromosoma(solucion_vecina)

        # Calcular diferencia de energía
        diferencia_energia = energia_vecina - energia_actual

        # Criterio de aceptación (recocido simulado)
                    if   diferencia_energia   <   0   or   random.random()   <
math.exp(-diferencia_energia / temperature):
            solucion_actual = solucion_vecina
            energia_actual = energia_vecina

            # Actualizar mejor solución
            if energia_actual < mejor_energia:
                mejor_solucion = solucion_actual
                mejor_energia = energia_actual

    # Filtrar soluciones inválidas
    iteraciones_validas = []
    energias_validas = []
    mejoresenergias_validas = []
    temperaturas_validas = []

    for i in range(len(iteraciones)):
        if energias[i] != float('inf'):
            iteraciones_validas.append(iteraciones[i])
            energias_validas.append(energias[i])
            mejoresenergias_validas.append(best_energias[i])
            temperaturas_validas.append(temperaturas[i])

    # Crear figura con dos subplots
    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(14, 5))

    # Plot 1: Función Objetivo vs Iteraciones
    if iteraciones_validas:
        ax1.plot(iteraciones_validas, mejoresenergias_validas,
                 label='Mejor solución', color='red', linewidth=2)
        ax1.set_xlabel('Iteraciones')
        ax1.set_ylabel('Valor Función objetivo [$]')
        ax1.set_title('Valor Función Objetivo vs. Iteraciones')
        ax1.grid(True)
        ax1.legend()

        # Plot 2: Temperatura vs Iteraciones
        ax2.plot(iteraciones_validas, temperaturas_validas,
                 label='Temperatura', color='green')
        ax2.set_xlabel('Iteraciones')
```

```
        ax2.set_ylabel('Temperatura')
        ax2.set_title('Temperatura vs. Iteraciones')
        ax2.grid(True)
        ax2.legend()

        plt.tight_layout()
        plt.show()
    else:
        print("No se encontraron soluciones válidas para graficar")

    # Guardar resultados en CSV
    with open("results_sa.csv", "w", newline='') as file:
        writer = csv.writer(file)
        writer.writerow(["iteracion", "Objective Value"])
        writer.writerows(energias_validas)

    # Mostrar mejor solución
    print("\n=== MEJOR SOLUCIÓN ENCONTRADA ===")
    print("Iteración final:", iteracionesMax)
    print("Cromosoma:", mejor_solucion)
    print("Función objetivo:", mejor_energia)

    return mejor_solucion, mejor_energia

# Ejecutar Simulated Annealing
temp_inicial = 1000
cooling_rate = 0.99
iteracionesMax = 1000

mejor_solucion, mejor_energia = simulated_annealing(temp_inicial, cooling_rate,
iteracionesMax)

# Mostrar resultados finales
print("\n=== MEJOR SOLUCIÓN ENCONTRADA ===")
print(f"Iteración final: {iteracionesMax}")
print(f"Cromosoma: {mejor_solucion}")
print(f"Función objetivo: {mejor_energia}")
```

Anexo 4: Código Algoritmo Genético multiobjetivo (NSGA-II)

```
# ALGORITMO NSGA-II
Optimización del diseño de transformadores
Autores: Flamini Marczuk y Sainz
Fecha:Marzo 2025
# Funciones específicas de NSGA-II
def ordenar_no_dominadas(poblacion, valores_aptitud):
    """Realiza clasificación no dominada de las soluciones."""
    frentes = [[]]
    conteos_dominacion = [0] * len(poblacion)
    soluciones_dominadas = [[] for _ in range(len(poblacion))]

    for i in range(len(poblacion)):
        for j in range(len(poblacion)):
            if i == j:
                continue
            # Verificar dominancia
            domina = True
            for k in range(len(valores_aptitud[i])):
                if valores_aptitud[i][k] > valores_aptitud[j][k]:
                    domina = False
                    break

            if domina:
                soluciones_dominadas[i].append(j)
              elif all(valores_aptitud[j][k] <= valores_aptitud[i][k] for k in
range(len(valores_aptitud[j]))):
                conteos_dominacion[i] += 1

            if conteos_dominacion[i] == 0:
                frentes[0].append(i)

    i = 0
    while frentes[i]:
        siguiente_frente = []
        for p in frentes[i]:
            for q in soluciones_dominadas[p]:
                conteos_dominacion[q] -= 1
                if conteos_dominacion[q] == 0:
                    siguiente_frente.append(q)
        i += 1
```

```
        frentes.append(siguiente_frente)
    return frentes[:-1]

def tournament_selection(poblacion, valores_aptitud, tamano_torneo=2):
    """Selección por torneo para padres de nueva generación."""
    seleccionados = []
    tamano_poblacion = len(poblacion)

    for _ in range(2):  # Seleccionar 2 padres
        tamano_torneo_actual = min(tamano_torneo, tamano_poblacion)
                        candidatos   =   random.sample(range(tamano_poblacion),
tamano_torneo_actual)

        # Seleccionar ganador basado en suma de objetivos (minimización)
        ganador = min(candidatos, key=lambda x: sum(valores_aptitud[x]))
        seleccionados.append(poblacion[ganador])

    return seleccionados

def plot_pareto_front(frente_pareto):
    """Grafica el frente de Pareto y guarda resultados en Excel."""
    perdidas = []
    costos = []
    soluciones = []

    for idx, cromosoma in enumerate(frente_pareto):
        perdidas_totales, costos_material = evaluar_cromosoma(cromosoma)
        if not (math.isinf(perdidas_totales) or math.isinf(costos_material)):
            perdidas.append(perdidas_totales)
            costos.append(costos_material)
            soluciones.append({
                'Solución': idx + 1,
                'Pérdidas Totales (W)': perdidas_totales,
                'Costos Material ($)': costos_material,
                'NroVueltasBT': cromosoma[0],
                'D_Columnas': cromosoma[1],
                'CoefUt': cromosoma[2],
                'Sección BT': f"{cromosoma[3][1]}x{cromosoma[3][2]}",
                'Sección MT': f"Ø{cromosoma[4][1]}",
                'Inducción Máx': cromosoma[5]
            })

    # Crear DataFrame y guardar en Excel
    df = pd.DataFrame(soluciones)
    df.to_excel('frente_pareto.xlsx', index=False)

    # Graficar frente de Pareto
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.scatter(perdidas, costos, color='blue')

    # Añadir etiquetas numéricas
    for i, (x, y) in enumerate(zip(perdidas, costos)):
        plt.text(x, y, str(i+1), fontsize=9, ha='right', va='bottom')
```

```
    plt.xlabel('Pérdidas Totales (W)')
    plt.ylabel('Costos Material ($)')
    plt.title('Frente de Pareto: Pérdidas vs Costos')
    plt.grid(True)
    plt.show()

def nsga2(tamano_poblacion=12, generaciones=200, num_elites=6):
    """Algoritmo principal NSGA-II para optimización multiobjetivo."""
    población = [generar_cromosoma() for _ in range(tamano_poblacion)]
    frente_pareto = []
    archivo = []
    soluciones_válidas_mín = 6  # Mínimo requerido para cruce

    for gen in range(generaciones):
        # Evaluar población actual
            valores_aptitud = [evaluar_cromosoma(cromosoma) for cromosoma in
población]

        # Filtrar soluciones válidas
        índices_válidos = [i for i, f in enumerate(valores_aptitud)
                           if f[0] != float('inf') and f[1] != float('inf')]
        población_válida = [población[i] for i in índices_válidos]
        aptitud_válida = [valores_aptitud[i] for i in índices_válidos]

        # Clasificación no dominada
        frentes = ordenar_no_dominadas(población_válida, aptitud_válida)

        # Actualizar archivo con soluciones no dominadas
        frente_actual = [población_válida[i] for i in frentes[0]]
        archivo.extend(frente_actual)

        # Remover soluciones dominadas del archivo
        aptitud_archivo = [evaluar_cromosoma(cromo) for cromo in archivo]
        frentes_archivo = ordenar_no_dominadas(archivo, aptitud_archivo)
        archivo = [archivo[i] for i in frentes_archivo[0]]

        # Selección y reproducción
        descendencia = []

        # Preservar élites
        if frentes and len(frentes[0]) > 0:
                           elites = random.sample(frentes[0], min(num_elites,
len(frentes[0])))
            descendencia.extend([población_válida[i] for i in elites])

        # Generar descendencia mediante selección y cruce
        while len(descendencia) < tamano_poblacion:
            padres = tournament_selection(población_válida, aptitud_válida, 2)
            hijo = crossover(padres[0], padres[1])
            if random.random() < 0.9:  # Probabilidad de mutación
                hijo = mutate(hijo, gen, generaciones)
            descendencia.append(hijo)
```

```
        población = descendencia[:tamano_poblacion]

    return archivo

# Ejecutar NSGA-II y graficar resultados
frente_pareto = nsga2()
plot_pareto_front(frente_pareto)
```

Anexo 5: Validación del funcionamiento de los algoritmos empleados: problema sencillo

GA

Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo genético desarrollado, se lo aplicó inicialmente a un problema de optimización simple cuya solución óptima es conocida de antemano. Este enfoque permite validar que la implementación del algoritmo, así como sus operadores de selección, cruce y mutación, funcionan adecuadamente y son capaces de converger hacia la solución esperada.

La función matemática a optimizar es la siguiente:

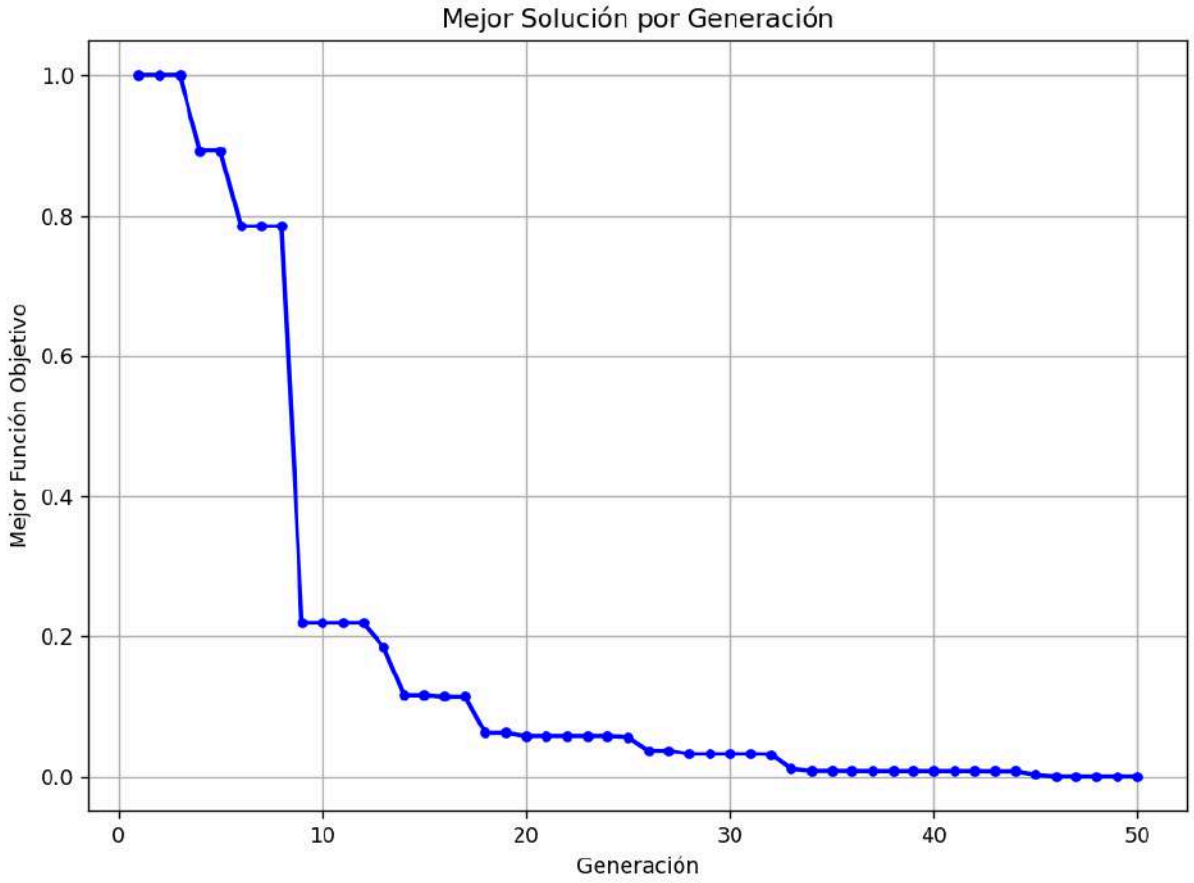
$$f(x, y, z, w, a, b) = (x - 2)^2 + sen(y + 1)^2 + (z - 0,5)^4 + (w + 3)^2 + (a - 1)^2 + cos(b)^2$$

El mínimo absoluto es conocido ($f_{mín} = 0$) y se da cuando:

- $x = 2$
- $y = -1$
- $z = 0,5$
- $w = -3$
- $a = 1$
- $b = 0$

El problema es más sencillo por lo que requiere de menos generaciones para converger al resultado óptimo. Tras correr el programa con las siguientes variables de entrada se obtuvo lo siguiente:

Población	Generaciones	Mutación
12	50	Primera mitad: 2 $genes$ Segunda mitad: 1 gen

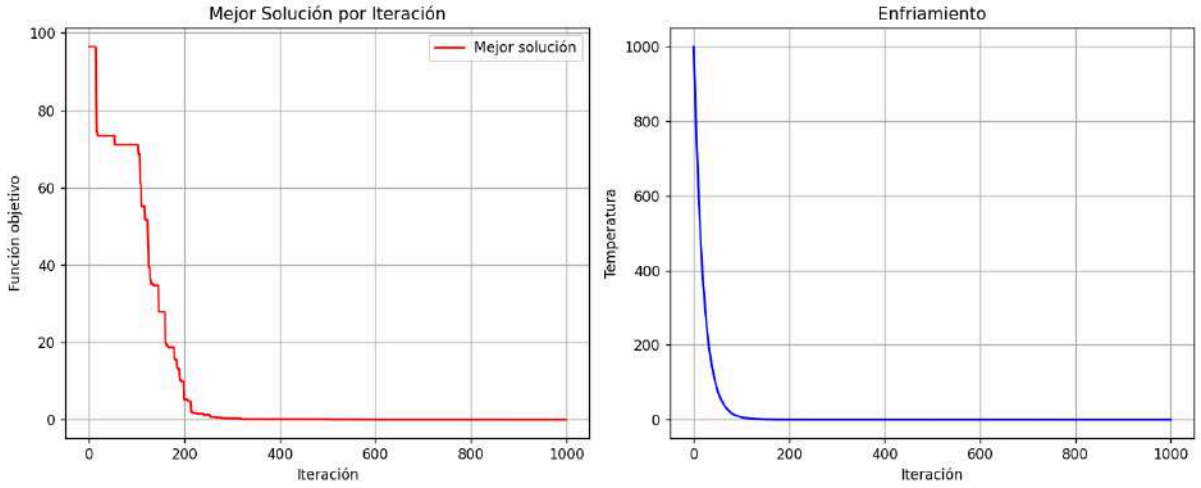


	Valor obtenido	Valor exacto
$f(x, y, z, w, a, b)$	$0,0024$	0
x	$2,0055$	2
y	$-1,0047$	-1
z	$0,5184$	$0,5$
w	-3	-3
a	$0,9935$	1
b	$1,5227$	$1,5$

Al comparar los resultados obtenidos con el valor teórico mínimo, se comprobó que el algoritmo es capaz de identificar soluciones cercanas o idénticas al óptimo, lo que brinda una base sólida para su posterior aplicación a problemas más complejos, como el diseño óptimo de transformadores de distribución.

SA

Al realizar el mismo problema sencillo utilizado para validar el GA pero sobre el código del Simulated Annealing, también se obtuvieron resultados coherentes.



	Valor obtenido	Valor exacto
$f(x, y, z, w, a, b)$	$0,0024$	0
x	$2,022$	2
y	$-1,0015$	-1
z	$0,46165$	$0,5$
w	$-2,9254$	-3
a	1	1
b	$1,5682$	$1,5$

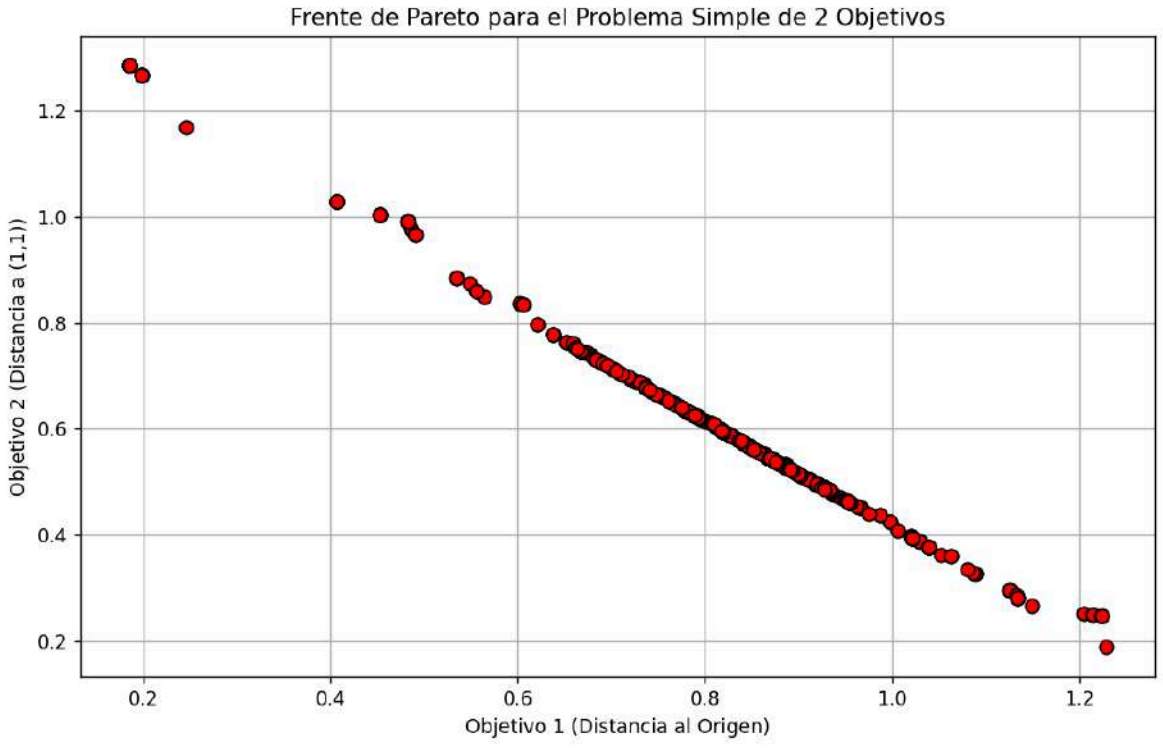
Nuevamente se comprueba el funcionamiento del algoritmo para ser aplicado en problemas más complejos.

NSGA-II

Problema Sencillo de Optimización Multiobjetivo: Minimizar distancia al Origen y al Punto (1,1)

Este problema está diseñado para ser un ejemplo claro y directo con el que validar algoritmos de optimización multiobjetivo como NSGA-II. Se busca un punto (x,y) en un plano bidimensional, pero con la particularidad de que este punto debe estar confinado dentro de un cuadrado unitario, es decir, tanto x como y deben estar entre 0 y 1. Nuestro objetivo es encontrar puntos que minimicen simultáneamente dos cosas: primero, la distancia de ese punto al origen (0,0), y segundo, la distancia de ese mismo punto al punto (1,1). Estos dos objetivos son inherentemente conflictivos; para acercarnos al origen, nos alejamos de (1,1) y viceversa.

Debido a la naturaleza conflictiva de los objetivos, no existe una única solución "mejor" que minimice ambas distancias a la vez. Para este problema particular, el frente de Pareto teóricamente consiste en todos los puntos (x,y) donde x=y en el rango de 0 a 1. Esto se debe a que cualquier punto que no esté en esta diagonal puede ser mejorado en al menos uno de los objetivos sin empeorar el otro. Por ejemplo, si se tiene un punto (0,5 ; 0,3), se lo puede mover hacia (0,4 ; 0,4) y estar más cerca del origen, o hacia (0,6 ; 0,6) para acercarte a (1 ; 1), lo que demuestra que puntos fuera de la diagonal no son óptimos de Pareto. Al visualizar el resultado de NSGA-II, se deberían ver los puntos del frente de Pareto alineados a lo largo de esta diagonal imaginaria en el espacio de objetivos.



De las 518 soluciones halladas y que conforman el frente de Pareto, analizamos 10:

Solución 1: x=0.3308, y=0.4196, Obj1=0.5343, Obj2=0.8859
Solución 2: x=0.4671, y=0.4760, Obj1=0.6669, Obj2=0.7474
Solución 3: x=0.9392, y=0.7555, Obj1=1.2053, Obj2=0.2520
Solución 4: x=0.4133, y=0.1853, Obj1=0.4530, Obj2=1.0039
Solución 5: x=0.4529, y=0.4678, Obj1=0.6512, Obj2=0.7632
Solución 6: x=0.1974, y=0.0202, Obj1=0.1984, Obj2=1.2666
Solución 7: x=0.9392, y=0.7555, Obj1=1.2053, Obj2=0.2520
Solución 8: x=0.3308, y=0.4196, Obj1=0.5343, Obj2=0.8859
Solución 9: x=0.1974, y=0.0202, Obj1=0.1984, Obj2=1.2666
Solución 10: x=0.4529, y=0.4678, Obj1=0.6512, Obj2=0.7632

Se observa que se trata de soluciones donde $x \simeq y$ lo que muestra un correcto funcionamiento del algoritmo.

Anexo 6: Catálogos de transformadores comerciales comparados

Alfanar (Aluminio)

Standard Losses Transformer (Aluminium)

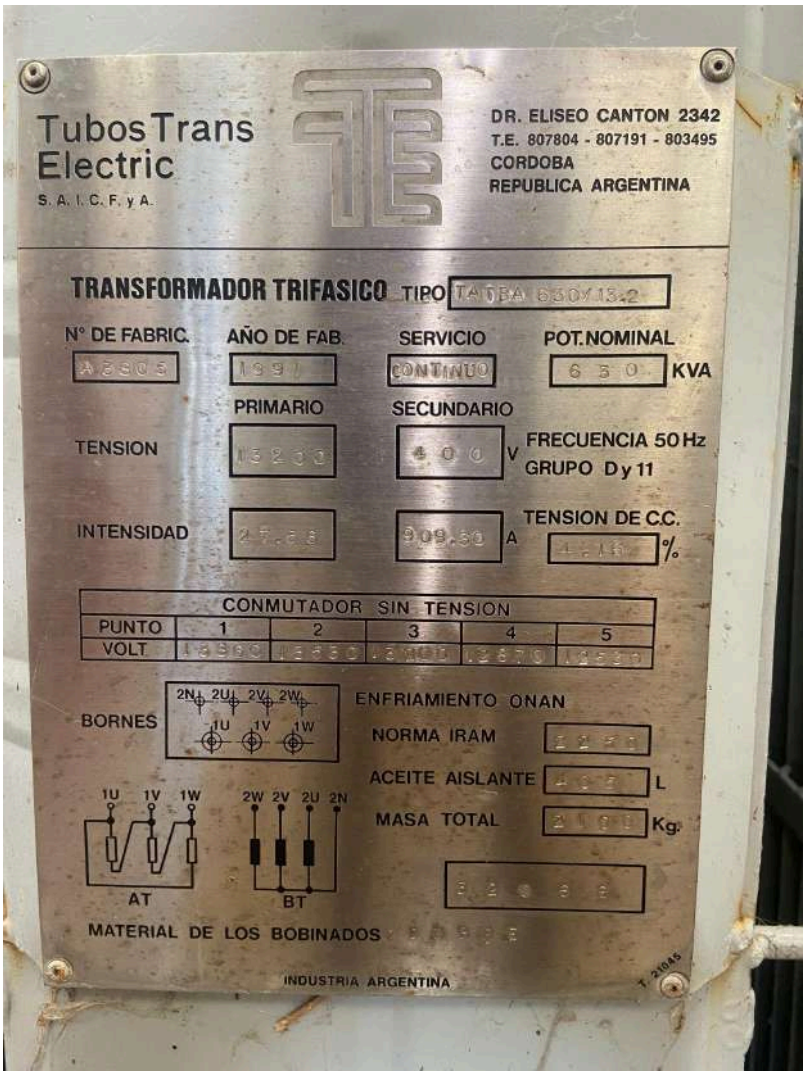
Rated Power kVA	HV(kV)	LV(kV)	No Load Loss W	Load Loss W	Impedance%	Width mm	Depth mm	Height mm	Weight Kg
100	13.8	0.4	300	2150	4	1050	650	1200	750
160	13.8	0.4	440	2600	4	1100	700	1200	850
200	13.8	0.4	480	2950	4	1200	750	1230	950
250	13.8	0.4	550	3650	4	1200	800	1250	1100
300	13.8	0.4	630	4200	4	1350	850	1300	1150
400	13.8	0.4	750	5000	4	1400	850	1350	1500
500	13.8	0.4	850	6000	5	1450	900	1350	1650
630	13.8	0.4	900	8000	5	1550	950	1400	2100
800	13.8	0.4	1250	9000	5	1600	1050	1550	2500
1000	13.8	0.4	1450	12000	6	1650	1100	1550	2800
1250	13.8	0.4	1700	13000	6	1850	1200	1600	3150
1500	13.8	0.4	1850	16500	6	2000	1350	1600	3700
1600	13.8	0.4	2050	18000	6	2100	1400	1700	4400
2000	13.8	0.4	2800	19500	6	2150	1450	1900	4900
2500	13.8	0.4	3000	25500	6	2250	1450	2150	6200
3150	13.8	0.4	3300	30000	7.5	2350	1800	2400	8000
300	33	0.4	630	4200	4	1450	950	1400	1400
500	33	0.4	850	6000	5	1500	1000	1500	1900
630	33	0.4	900	8000	5	1600	1050	1600	2200
1000	33	0.4	1450	12000	6	1800	1150	1700	3000
1250	33	0.4	1700	13000	6	1900	1300	1800	3800
1500	33	0.4	1850	16500	6	2050	1400	2000	4500
1600	33	0.4	2050	18000	6	2150	1450	2050	4700
2000	33	0.4	2800	19500	6	2200	1500	2200	5600
2500	33	0.4	3000	25500	7	2300	1800	2300	7100

TTE (Cobre)

Dimensiones (mm) y Pesos (kg)
Dimensions (mm) and Weights (kg)

13,2 kV

Potencia Nominal (kVA) Rated Power (kVA)	63	100	160	200	250	315	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
A (Largo) A (Length)	860	990	1040	1190	1290	1440	1540	1700	1860	1920	2100	2280	2310	2350
B (Ancho) B (Width)	700	760	770	860	880	880	890	1030	1050	1080	1260	1360	1350	1430
C (Alto) C (Height)	1140	1160	1230	1290	1370	1430	1420	1470	1520	1600	2710	1720	1880	2080
D (Trocha) D (Wheels cross path)	600	600	600	600	700	700	700	800	800	800	1000	1000	1000	1200
E (Ancho de Rueda) E (Wheels Width)	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	80	80	80	80
F (Despeje de Rueda) F (Wheels height)	100	100	100	100	130	130	130	37	37	37	50	50	50	50
G (Altura de Tapa) G (Top Height)	820	820	880	940	1020	1080	1090	1120	1170	1250	1360	1320	1480	1680
H (Dist. e/Aisladores AT) H (Dist. between HV Bushings)	265	265	265	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
J (Dist. e/Aisladores BT) J (Dist. between LV Bushings)	120	120	120	120	120	120	200	200	200	200	200	200	200	200
Peso (kg) Weight (kg) Aceite Oil	114	145	181	210	223	262	310	394	516	595	784	835	975	1235
Total Total	450	580	770	920	1020	1220	1540	1910	2365	2670	3460	3900	450	5470



Anexo 7: Datos de la PC en la que se realizaron las simulaciones

Procesador	Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU @ 1.60GHz 2.11 GHz
RAM instalada	8,00 GB (7,83 GB usable)
Identificador de dispositivo	3123BB5A-C792-4AE7-ADA9-207DA9C8DE41
Id. del producto	00330-81496-80906-AA627
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64
Lápiz y entrada táctil	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

ANEXO II

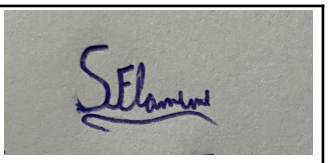
Autorización Repositorio Institucional RINFI

Facultad de Ingeniería - UNMDP

En calidad de TITULARES de los derechos de autor de la obra que se detalla a continuación, y sin infringir según mi conocimiento derechos de terceros, por la presente informo a la Facultad de Ingeniería de la UNMDP mi decisión de concederle en forma gratuita, no exclusiva y por tiempo ilimitado la autorización para:

Publicar el texto del trabajo más abajo indicado, exclusivamente en medio digital, en el sitio web de la Facultad y/o Universidad, por Internet, a título de divulgación gratuita de la producción científica generada por la Facultad, a partir de la fecha especificada.

Permitir a la Biblioteca que, sin producir cambios en el contenido, establezca los formatos de publicación en la web para su más adecuada visualización y la realización de copias digitales y migraciones de formato necesarias para la seguridad, resguardo y preservación a largo plazo de la presente obra:

Autor 1: Segundo Flamini Marczuk Documento: 44265294. Teléfono: 2235729333 E-mail: segundoflamini@gmail.com	 Firma 1
Autor 2: Octavio Sainz Documento: 41783507 Teléfono: 2234559090 E-mail: octasainz@gmail.com	 Firma 2
Director/a: Justo José Roberts Documento: 30184195 Leg. 1867	 Firma Director/a
Codirector/a: Israel Joaquín Sánchez Documento: 31264488	 Firma Codirector/a

2. Título obtenido:
Ingeniero Electromecánico

3. Identificación/Título de la Obra:
“Optimización en el diseño de transformadores de distribución”

4. AUTORIZO la publicación bajo con la licencia Creative Commons BY-NC-ND Atribución-NoComercial-Sin Obra Derivada.

5. **Nota de Embargo:** Para aquellas obras que NO pueden ser de acceso a texto completo por razones de acuerdos previos con empresas o instituciones; por razones de índole comercial u otras razones; se procederá según lo establecido en Art. 6 de la Ley 26899 de Repositorios digitales institucionales de acceso abierto:

> **ARTICULO 6º —** En caso que las producciones científico-tecnológicas y los datos primarios estuvieran protegidos por derechos de propiedad industrial y/o acuerdos previos con terceros, los autores deberán proporcionar y autorizar el acceso público a los metadatos de dichas obras intelectuales y/o datos primarios, comprometiéndose a proporcionar acceso a los documentos y datos primarios completos a partir del vencimiento del plazo de protección de los derechos de propiedad industrial o de la extinción de los acuerdos previos antes referidos.
>
> Asimismo, podrá excluirse la difusión de aquellos datos primarios o resultados preliminares y/o definitivos de una investigación no publicada ni patentada que deban mantenerse en confidencialidad, requiriéndose a tal fin la debida justificación institucional de los motivos que impidan su difusión. Será potestad de la institución responsable en acuerdo con el investigador o equipo de investigación, establecer la pertinencia del momento en que dicha información deberá darse a conocer. A los efectos de la presente ley se entenderá como “metadato” a toda aquella información descriptiva sobre el contexto, calidad, condición o características de un recurso, dato u objeto, que tiene la finalidad de facilitar su búsqueda, recuperación, autentificación, evaluación, preservación y/o interoperabilidad.

En razón de lo expuesto, si el Trabajo se encuentra comprendido en el caso de que su producción esté protegida por derechos de Propiedad Industrial y/o acuerdos previos con terceros que implique la confidencialidad de los mismos, el/la directora/a debe indicar a continuación motivos y fecha de finalización del embargo:

NO SE AUTORIZA la publicación antes de la fecha **01 /09 / 2026** por los siguientes motivos:

Los resultados obtenidos en el Trabajo aún no han sido publicados, por lo que se solicita aplazar la publicación del Trabajo completo, hasta tanto se consiga publicar los resultados.

Cumplido el plazo del embargo, estará accesible a texto completo según contempla la normativa vigente.

Justo José Roberts

Director/a del TFG