

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**“DESARROLLO DE METODOLOGÍAS PRECISAS Y EFICIENTES
PARA OPTIMIZAR LA AMPACIDAD DE CABLES
SUBTERRÁNEOS DE ALTA TENSIÓN, MINIMIZANDO COSTOS
DE INSTALACIÓN Y MAXIMIZANDO SU VIDA ÚTIL”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN ENERGÉTICA**

ELABORADO POR:

Msc. BRAYAN ANDERSON ATOCCSA AGUILAR

ASESOR:

Dr. MODESTO TOMÁS PALMA GARCÍA

LIMA - PERÚ

Abril, 2024

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mi madre Elizabeth, por su amor incondicional y apoyo inquebrantable durante toda mi vida y carrera académica. También dedico este trabajo a mi hijo Evans Cooper, por ser mi fuente de inspiración y motivación para alcanzar mis metas. Finalmente, este logro también es para mí, como una muestra del poder de la perseverancia y el compromiso con nuestros sueños

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a Dios por darme la fortaleza, la inspiración y la sabiduría para llevar a cabo este proyecto de tesis doctoral. Este logro no habría sido posible sin su guía y su bendición.

También quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre Elizabet y a mi hermano Jesús, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y su comprensión durante todo mi camino académico. Han sido mi mayor motivación y me han brindado la tranquilidad y el respaldo emocional que necesitaba para concentrarme en esta investigación.

Agradezco profundamente al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) y al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por financiar y proveer los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su apoyo financiero ha sido fundamental para que pudiera dedicar todo mi tiempo y energía a esta tesis.

Quiero agradecer también a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UNI por permitirme formar parte de su programa de doctorado y por brindarme las herramientas necesarias para desarrollar esta tesis. Agradezco en especial a mi asesor, el Dr. Ing. Modesto Tomás Palma García, por su paciencia, su tiempo y sus valiosas contribuciones en la supervisión y revisión de esta tesis. Sus consejos y su experiencia han sido fundamentales para el éxito de esta investigación.

Asimismo, quiero expresar mi gratitud al Dr. Moisés Flores por sus valiosas sugerencias y apoyo durante todo el proceso de investigación. También quiero agradecer al Dr. Luyo, coordinador del programa de doctorado, por su insistencia en el avance de la tesis.

Finalmente, agradezco a todas las personas que conocí durante mi proyecto de tesis doctoral y que han contribuido significativamente a la configuración de esta investigación. Sus discusiones técnicas y sugerencias en conferencias, talleres y otros foros han sido invaluables para mi formación como investigador. Su apoyo ha sido esencial en este proceso y siempre estaré agradecido por su colaboración y amistad.

Resumen

La instalación de cables subterráneos ha experimentado un aumento notorio como opción para el suministro de energía eléctrica. Uno de los factores críticos a considerar en este proceso es el costo, sin dejar de lado la ampacidad y la vida útil del cable. Con el objetivo de mejorar la eficiencia y disipar el calor generado por el efecto Joule, es común utilizar rellenos térmicos con baja resistividad térmica. Sin embargo, el costo sustancial y la necesidad de aumentar la ampacidad se presentan como factores competitivos en la selección del relleno térmico. Además, la ampacidad y la vida útil del cable están influenciadas por diversos factores, como el costo del relleno térmico, las dimensiones de la instalación, el tipo de cubierta del cable, el tamaño de los conductores y la temperatura del entorno, entre otros.

En este contexto, el objetivo principal es desarrollar metodologías precisas y eficientes para optimizar la ampacidad de cables subterráneos de alta tensión, minimizando los costos de instalación y maximizando su vida útil. Para abordar este propósito, se han formulado problemas de optimización no lineal, uno enfocado en la ampacidad del cable y otro abordando tanto la ampacidad como el costo de instalación. Además, se propone una metodología para tres objetivos mediante el enfoque probabilístico y la técnica de optimización, con el propósito de maximizar simultáneamente la ampacidad, la vida útil del cable y minimizar los costos de instalación.

Para abordar la optimización, se han empleado diferentes algoritmos, como el enjambre de partículas (PSO) con varias mejoras, el algoritmo genético (GA) con reinicio adaptativo, el Minimizador de Funciones con Restricciones (FMinCon) y el algoritmo *gamultiobj*. Además, para tratar el enfoque probabilístico se ha considerado el método Montecarlo.

Los resultados obtenidos revelan que se logró desarrollar metodologías precisas y eficientes tanto para la optimización monoobjetivo de la ampacidad de cables como para la optimización multiobjetivo de dos y tres funciones simultáneamente. Se encontró que la optimización multiobjetivo, que considera tanto la ampacidad, los costos de instalación y la vida útil del aislamiento, puede brindar una solución más equilibrada.

Palabras clave: Instalación subterránea, Ampacidad, Vida útil del cable, Rellenos térmicos, Efecto Joule, Costo instalación, Optimización no lineal, PSO, GA, FMinCon, *gamultiobj*, Enfoque probabilístico, Método Montecarlo, Optimización multiobjetivo.

Abstract

The installation of underground cables has experienced a noticeable increase as an option for electrical power supply. One of the critical factors to consider in this process is the cost, without neglecting ampacity and the cable's lifespan. In order to enhance efficiency and dissipate heat generated by the Joule effect, it is common to use thermal backfills with low thermal resistivity. However, substantial cost and the need to increase ampacity present themselves as competitive factors in the selection of thermal backfill. Additionally, ampacity and the cable's lifespan are influenced by various factors, such as the cost of thermal backfill, installation dimensions, cable insulation type, conductor size, and environmental temperature, among others.

In this context, the main objective is to develop a precise and efficient methodology to optimize the ampacity of high-voltage underground cables, minimizing installation costs, and maximizing their lifespan. To address this purpose, nonlinear optimization problems have been formulated—one focusing on cable ampacity and another addressing both ampacity and installation costs. Furthermore, a methodology for three objectives is proposed using a probabilistic approach and optimization techniques to simultaneously maximize ampacity, cable lifespan, and minimize installation costs.

To address optimization, various algorithms have been employed, such as the particle swarm optimization (PSO) with several enhancements, the genetic algorithm (GA) with adaptive restart, the Function Minimizer with Constraints (FMinCon), and the *gamultiobj* algorithm. Additionally, to handle the probabilistic approach, the Monte Carlo method has been considered.

The obtained results reveal the successful development of a precise and efficient methodology for both single-objective optimization of cable ampacity and multi-objective optimization of two and three functions simultaneously. It was found that multi-objective optimization, considering both ampacity, installation costs, and insulation lifespan, can provide a more balanced solution.

Keywords: Underground installation, Ampacity, Cable lifespan, Thermal backfills, Joule effect, Installation cost, Nonlinear optimization, PSO, GA, FMinCon, *gamultiobj* algorithm, Probabilistic approach, Monte Carlo method, Multi-objective optimization.

Introducción

En el contexto de la transmisión de energía eléctrica en entornos urbanos densamente poblados, la adopción de cables subterráneos de alta tensión surge como una solución técnica fundamental. Este cambio no solo responde a la limitación de espacio para cables aéreos, sino también a la necesidad de reducir interrupciones causadas por condiciones climáticas adversas, las cuales afectan considerablemente a las líneas aéreas de transmisión.

En climas desafiantes, como tormentas, vientos fuertes y condiciones extremas, las líneas aéreas de transmisión enfrentan interrupciones frecuentes y daños significativos. La vulnerabilidad de estas infraestructuras a las inclemencias meteorológicas ha generado una preferencia creciente por la instalación subterránea de cables de alta tensión, minimizando así la exposición a factores climáticos y mejorando la resiliencia y fiabilidad del suministro eléctrico.

En este contexto, la transmisión de energía eléctrica a través de cables subterráneos ha ganado una importancia significativa en proyectos de alta tensión debido a sus ventajas evidentes. No obstante, este cambio hacia la transmisión subterránea presenta desafíos cruciales relacionados con costos, ampacidad y vida útil del aislamiento. La optimización de estos aspectos se vuelve esencial para la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas eléctricos.

La necesidad de abordar la optimización de cables subterráneos de alta tensión responde no solo a la creciente demanda de energía, sino también a la evolución de las expectativas en términos de fiabilidad del suministro, sostenibilidad ambiental y eficiencia energética. Esta tesis doctoral se embarca en una exploración integral de los factores que influyen en la eficiencia y confiabilidad de las instalaciones subterráneas de transmisión eléctrica, buscando no solo comprender los desafíos existentes, sino también proponer soluciones innovadoras y estrategias de optimización.

A lo largo de esta investigación, se explorarán antecedentes, se planteará la problemática específica, se proporcionará la motivación que impulsa la investigación y se realizará una revisión de la literatura relevante. El objetivo principal es presentar una metodología precisa y eficiente que aborde los desafíos críticos asociados con la instalación de cables subterráneos de alta tensión, estableciendo así un marco integral para el desarrollo de sistemas eléctricos más fiables y eficientes.

Índice de Contenidos

Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	1
Capítulo 1: Protocolo de Investigación	1
1.1 Motivación de la investigación	1
1.2 Contexto y antecedentes	2
1.3 Planteamiento del Problema	5
1.4 Objetivo de la Investigación	6
1.5 Hipótesis y Variables	7
1.5.1 Hipótesis	7
1.5.2 Variables	8
1.6 Metodología	9
1.7 Aspectos clave de la investigación	10
1.8 Estructura de la tesis	11
Capítulo 2:Marco Teórico	13
2.1 Diseño de cables para la red de transmisión	13
2.1.1 Conductor	14
2.1.2 Aislamiento	16
2.1.3 Pantalla	17
2.1.4 Capas semiconductoras	17
2.1.5 Revestimiento externo	18
2.2 Instalaciones y Configuraciones	18
2.2.1 Técnicas de unión	22
2.3 Cálculos de ampacidad de cables subterraneos	24
2.3.1 Mecanismo de transferencia de calor	25
2.3.1.1 Conducción	25
2.3.1.2 Convección	26
2.3.1.3 Radiación	26

2.3.1.4	Ecuaciones de balance energético	27
2.3.2	Ecuaciones de transferencia de calor	27
2.3.3	Analogías de red eléctrica y Red Térmica	29
2.3.3.1	Resistencia térmica	29
2.3.3.2	Capacitancia térmica	30
2.3.4	Pérdidas en los parámetros eléctricos	31
2.3.4.1	Pérdidas de energía en el conductor	31
2.3.4.2	Pérdidas dieléctricas del aislamiento	35
2.3.4.3	Pérdidas en la cubierta y armadura	37
2.3.4.4	Pérdidas de corriente circulante	38
2.3.4.5	Pérdidas por corrientes de Foucault en la cubierta	41
2.3.5	Comportamiento térmico del cable	43
2.3.5.1	Resistencias Térmicas Internas	44
2.3.5.2	Resistencias Térmicas externas	45
2.3.6	Ampacidad del cable en condiciones de estado estacionario	50
2.3.6.1	Cables enterrados sin migración de humedad	50
2.4	Cálculo de vida electro-térmica del aislamiento	53
2.4.1	Envejecimiento Térmico	53
2.4.2	Envejecimiento Eléctrico	56
2.4.3	Modelos de vida para estrés combinado	57
2.5	Formulación y Técnicas de optimización	57
2.5.1	Formulación de optimización	58
2.5.1.1	Formulación general monoobjetivo	58
2.5.1.2	Formulación general multiobjetivo	59
2.5.2	Métodos de optimización	60
2.5.2.1	Enfoque Determinista	61
2.5.2.2	Enfoque Estocástico	62
Capítulo 3: Desarrollo del Trabajo de Investigación		64
3.1	Disposición y modelo de cable	64
3.2	Calculo de resistencia térmica externa	68
3.3	Cálculo de la ampacidad del cable	70
3.4	Costo de instalación	72

3.5	Optimización Mono - Objetivo	73
3.5.1	Formulación del problema de optimización I	73
3.5.2	La estructura propuesta del algoritmo genético (GA)	74
3.5.3	La estructura propuesta del algoritmo Enjambre de Partículas (PSO)	77
3.5.4	Resultados y discusiones I	80
3.5.5	Conclusiones I	90
3.6	Optimización Biobjetivo	91
3.6.1	Algoritmo FMinCon y Método de Suma Ponderada	93
3.6.2	Algoritmo PSO y Método de Suma Ponderada	94
3.6.3	Algoritmo <i>gamultiobj</i>	96
3.6.4	Resultados y Discusión II	97
3.6.5	Conclusiones II	106
3.7	Optimización Multiobjetivo	107
3.7.1	Generación de Combinaciones de Pesos	108
3.7.2	Determinación del Frente de Pareto de Tres Objetivos	109
3.8	Optimización simultánea de la ampacidad, costo y vida útil considerando parámetros estocásticos	111
3.8.1	Distribución de Probabilidad en Datos Históricos	111
3.8.1.1	Temperatura ambiente	111
3.8.1.2	Resistividad Térmica del Suelo y Relleno	113
3.8.1.3	Variabilidad en la Corriente de Carga	114
3.8.2	Optimización Multiobjetivo Mediante Análisis Monte Carlo y PSO .	115
3.8.3	Resultados de la Optimización	118
3.8.4	Conclusiones III	123
Conclusiones		125
4.2	Conclusiones generales de la investigación	125
4.2.1	O1. Optimización monoobjetiva de la ampacidad de cable	125
4.2.2	O2. Optimización multiobjetiva de la ampacidad de cable y costo de instalación	126
4.2.3	O3. Optimización simultánea del costo de instalación, la ampacidad y la vida útil del cable	127
4.3	Aportes de investigación	128

4.4	Aportes de O1.	128
4.5	Aportes de O2.	128
4.6	Aportes de O3.	129
4.7	Líneas futuras de investigación	129
A	Cálculo de Parámetros del Cable	150
A.1	Resistencia DC del Conductor y la Cubierta	150
A.2	Factor de pérdida por corrientes de Foucault	151
A.3	Resistencias térmicas	151
A.4	Pérdidas dieléctricas	152
B	Códigos de Optimización en MATLAB	153
B.1	AG con Reinicio Adaptativo y Búsqueda Local	153
B.2	PSO con Mejoras	163
C	Matriz de Consistencia	167

List of Figures

1.1	Expansión de la estación planicie-industriales de 220kV.	2
1.2	Metodología de trabajo	10
2.1	Cable subterráneo con aislamiento XLPE de alto volteje [1].	13
2.2	Construcciones típicas de conductores de cable subterráneo [2, 3].	15
2.3	Cable de 400 kV con aislamiento XLPE reticulado y conductor de cobre de 1200 mm ² , que tienen una capacidad de 600 MVA sin refrigeración forzada y 1050 MVA con refrigeración forzada [4].	16
2.4	Instalaciones típicas de cables directamente enterrados.	19
2.5	Cable típico de núcleo único de XLPE y un cable tipo tubo típico.	19
2.6	Izquierda: un sistema de cable enterrado directamente en el suelo [4]; Derecha: entierro directo para cables triplexados [5].	20
2.7	Cables instalados en relleno.	21
2.8	Enfriamiento forzado de un cable lleno de fluido a baja presión.	21
2.9	Izquierda: Dos circuitos en un banco de conductos; Derecha: dos sistemas de cable XLPE de 400 kV en un túnel ventilado [4].	22
2.10	Representación esquemática de un sistema de cables con conexión cruzada. (a) Los cables no están transpuestos. (b) Los cables están transpuestos [6, 7, 8].	24
2.11	Representación del aislamiento de un cable.	36
2.12	Ilustración de la resistencia térmica externa de un solo cable enterrado bajo un plano isotérmico.	47
2.13	Representación de un relleno por una envoltura circular.	49
2.14	Círculo Térmico Equivalente para un Cable Mononúcleo Enterrado.	51
3.1	Configuración de Cable Subterráneo en Disposición Plana con Relleno Térmico.	65
3.2	Sección trasversal del cable de 220 kV con aislamiento XLPE [9].	67
3.3	Disposición de cables para calcular el calentamiento mutuo.	68
3.4	Modelo de Red de Equivalencia Termoeléctrica para Cable Enterrado.	69
3.5	La estructura propuesta de los algoritmos genéticos.	75
3.6	Diagrama de flujo de PSO.	78
3.7	a) Convergencia del GA. b) Convergencia del PSO.	81

3.8 a) Resultados óptimos por GA propuesto. b) Histograma.	82
3.9 a) Resultados óptimos por GA tradicional. b) Histograma de Ampacidad. .	83
3.10 a) Resultados óptimos por PSO. b) Histograma de Ampacidad.	84
3.11 a) Resultados óptimos por PSO mejorado. b) Histograma de Ampacidad. .	85
3.12 Efecto de la separación de cables sobre la ampacidad del cable.	88
3.13 Diagrama de flujo de la técnica FMinCon-MSP.	94
3.14 Frente de Pareto determinado por el enfoque FMinCon - MSP.	98
3.15 Frentes de Pareto para diferentes ejecuciones obtenidos con FMinCon-MSP. .	99
3.16 Frentes de Pareto Generado con PSO-MSP a) 600. b) 100, 600 y 1200. . .	100
3.17 Frentes de Pareto Normalizados y No Normalizados.	102
3.18 Frentes de Pareto con <code>gamultiobj</code> para diferentes tamaños de población. .	102
3.19 Comparación de Frentes de Pareto con técnicas propuestas y <code>gamultiobj</code> . .	104
3.20 Ampacidades Óptimas vs Variables de Diseño Optimizadas.	105
3.21 Frente de Pareto para Algunos Valores de ρ_r , ρ_s y θ_{amb}	106
3.22 Frente de Pareto 3D Obtenido con el Método Propuesto.	110
3.23 Variación de temperatura ambiente en el centro de Toronto.	112
3.24 Distribución normal ajustada al histograma y CDF de θ_{amb}	112
3.25 Variación de la resistividad del suelo/relleno.	113
3.26 Distribución normal ajustada al histograma y distribución acumulada de $\rho_{r,s}$. .	113
3.27 Histograma de corriente de carga del sistema de cable.	114
3.28 Distribución normal ajustada al histograma y distribución acumulada de la corriente de carga.	115
3.29 Diagrama de flujo del algoritmo propuesto usando enfoques Monte Carlo y PSO.	117
3.30 Variación de la Ampacidad en Cada Escenario.	119
3.31 Distribucion acumulado de Ampacidad.	121
3.32 Histogramas y Distribución Acumulada de Ampacidad para Valores Fijos de x	122

List of Tables

1.1	Variables de Investigación	9
2.1	Resistividad térmica y coeficientes de temperatura [10]	32
2.2	Valores experimentales del efecto de piel y de proximidad [10, 11, 12].	34
2.3	Modelos de vida para el estrés térmico y eléctrico [13, 14, 15, 16].	54
2.4	Parámetros constantes de envejecimiento del XLPE.	55
3.1	Parámetros y especificaciones del cable XLPE de 220 kV [9].	66
3.2	Parámetros del modelo de cable	71
3.3	Parámetros de costo para la optimización del relleno y ampacidad. [17, 18, 19].	72
3.4	Límites de las variables de diseño.	74
3.5	Conjunto de parámetros seleccionados de los algoritmos propuesto.	80
3.6	Análisis de Desempeño de los Algoritmos.	86
3.7	Resultado de la optimización.	86
3.8	Límites de las variables de diseño.	87
3.9	Valores mínimo y máximo de las funciones objetivo utilizados en el cálculo. .	101
3.10	Valores óptimos para distintas combinaciones de ρ_r , ρ_s y θ_{amb} con PSO-MSP.	103
3.11	Resultado de la optimización de tres objetivos.	110
3.12	Distribuciones de Probabilidad de los Parámetros $\rho_{s,r}$, θ_{amb} e I_{carga} [20]. . .	111
3.13	Resultados de la Optimización con Corriente de Carga.	120
C.1	Matriz de Consistencia	168

Capítulo 1: Protocolo de Investigación

La instalación de líneas de transmisión subterráneas de alta tensión es una tarea crítica en la industria eléctrica, ya que se requiere un diseño cuidadoso y una construcción precisa para garantizar la confiabilidad del sistema eléctrico. Además, se busca una reducción en los costos de mantenimiento y reemplazo de los cables, así como una prolongación de su ciclo de vida. En este contexto, las técnicas avanzadas de optimización se han convertido en una herramienta valiosa para los ingenieros y diseñadores de sistemas eléctricos. Este capítulo es esencial para comprender la importancia de la investigación y establecer el marco de trabajo que permita la consecución de los objetivos propuestos. La calidad y relevancia de la investigación presentada en este capítulo son fundamentales para el éxito de la tesis doctoral.

1.1 Motivación de la investigación

La optimización de la ampacidad de los cables subterráneos puede tener varios beneficios importantes en los sistemas de transmisión subterráneos.

En primer lugar, la optimización de la ampacidad puede evitar el sobredimensionamiento excesivo de los cables, lo que puede reducir significativamente los costos de instalación y mantenimiento de los sistemas de transmisión subterráneos. Según [21, 22, 23], la optimización de la ampacidad puede reducir los costos de instalación y los costos de mantenimiento en comparación con el diseño convencional de cables subterráneos.

En segundo lugar, la optimización de la ampacidad puede mejorar la eficiencia energética de los sistemas de transmisión subterráneos, lo que puede aumentar la cantidad de energía transmitida sin aumentar la capacidad del cable. Según [24, 25], la optimización de la ampacidad puede aumentar la capacidad de transmisión en un 15 % sin necesidad de aumentar la sección transversal del cable.

En tercer lugar, la optimización de la ampacidad puede mejorar la seguridad del sistema de transmisión subterráneo al garantizar que los cables estén dimensionados adecuadamente para soportar la carga eléctrica sin sobrecalentamiento. Según [26, 27], la optimización de la ampacidad puede reducir la probabilidad de fallas en el sistema de transmisión subterráneo.

Finalmente, la optimización de la ampacidad de los cables subterráneos es crucial para satisfacer las necesidades energéticas actuales y futuras, ya que la demanda de energía eléctrica sigue aumentando a nivel mundial. Según un informe de la Agencia Internacional de Energía, la demanda mundial de energía eléctrica se espera que aumente en un 70 % para 2040 [28].

En el Perú, ya existen tramos de transmisión subterránea entre subestaciones [29], tales como:

- línea de transmisión 220kV S.E. Santa Teresa – Suriray (puesta en operación en 2015)
- línea de transmisión 220kV Planicie - Industriales (puesta en operación en 2017)
- línea de transmisión 60kV Iquitos nueva - Iquitos (puesta en operación en 2017)

El proyecto de la línea de Transmisión Planicie-Industriales permitió la expansión del sistema de alta tensión en Lima Metropolitana mediante la construcción de un doble circuito, uno aéreo de aproximadamente 12.1 km y otro subterráneo de alrededor de 5.2 km, como se muestra en la [Figura 1.1](#). Para el análisis de la capacidad de corriente eléctrica (ampacidad) de los cables subterráneos de 220 kV con aislamiento de XLPE utilizados en el proyecto, se consideró el estándar IEC. Estos cables fueron instalados en tubos, entubados con HDPE y dispuestos en una formación trébol [30].



Figura 1.1. Expansión de la estación planicie-industriales de 220kV.

1.2 Contexto y antecedentes

La investigación sobre la optimización de la ampacidad de los cables subterráneos es de gran importancia en la ingeniería eléctrica [24]. En comparación con los cables aéreos, los cables subterráneos ofrecen varias ventajas, como una menor susceptibilidad a interrupciones debido a factores climáticos y ambientales, mayor estética y menor exposición a campos

electromagnéticos [25]. Además, en ciudades con alta densidad de población, los cables aéreos ya no son una opción viable. La ampacidad de los cables subterráneos está limitada por la cantidad de calor que se genera en la envolvente del cable debido a la resistencia del conductor y la resistencia térmica del suelo, que varía según las condiciones climáticas y geográficas [31].

Para mejorar la ampacidad de cables subterráneos de alta tensión, es importante incluir materiales de relleno térmico que optimicen la disipación del calor [32]. El artículo aborda la resistividad térmica efectiva de cables enterrados en el relleno térmico, presentando un modelo teórico que calcula la resistividad térmica del suelo alrededor del cable, considerando propiedades del suelo y geometría del cable.

En las últimas décadas, se han desarrollado diversas metodologías y enfoques para el cálculo de la ampacidad de los cables eléctricos. Por ejemplo, Anders presenta en [10] una metodología basada en la normativa y los estándares de la IEEE para el cálculo de la ampacidad en cables de transmisión, distribución y aplicaciones industriales, mientras que en colaboración con el IEEE, Anders también presenta en [7] una metodología para la evaluación de la ampacidad de los cables en ambientes térmicos desfavorables. Además, Moutassem y Anders proponen en [33] una metodología para la optimización de la configuración de los cables eléctricos subterráneos para lograr la máxima ampacidad, y Czapp y Ratkowski proponen en [34] un método de optimización de la configuración del material de relleno térmico para lograr la ampacidad deseada en cables de alta tensión.

Asimismo, se han llevado a cabo varios estudios sobre los factores que afectan la ampacidad de los cables subterráneos. Por ejemplo, De León [35, 36] y Al-Saud, El-Kady y Findlay [37] han abordado este tema desde diferentes enfoques, mientras que Moutassem y Anders [33] se centran en la optimización de la configuración de los cables subterráneos para lograr la mejor ampacidad posible mediante el uso de algoritmos. Además, Metwally, Al-Badi y Al Farsi [38] han analizado los factores que influyen en la ampacidad y la temperatura de los cables eléctricos subterráneos.

En los últimos años, se han llevado a cabo diversas investigaciones en el campo de la ingeniería eléctrica con el objetivo de optimizar la ampacidad en cables subterráneos. Por ejemplo, Perović et al. [39] proponen el uso del algoritmo de búsqueda gravitacional para optimizar el cableado subterráneo en formación de trébol, lo que podría mejorar la eficiencia energética y reducir los costos de los sistemas de cableado subterráneo. Oclón et al.

[40] analizan el rendimiento de un nuevo material de relleno térmico para cables eléctricos subterráneos con el fin de mejorar la disipación de calor y, por ende, la ampacidad de los cables. Klimenta et al. [41] sugieren que los pavimentos asfálticos hidrónicos pueden ser una alternativa para eliminar puntos calientes en sistemas de cableado subterráneo.

Además, se ha examinado el efecto de la conductividad térmica del suelo y la ampacidad del cable en el rendimiento térmico y los costos materiales de las líneas de transmisión subterráneas, como se discute en los artículos de Ocłon [23] y Cichy et al. [22, 42]. Los autores proponen una optimización económica de la instalación de cableado subterráneo y proporcionan recomendaciones para la optimización económica de la instalación.

Por otro lado, Sun y Makram [43] propusieron una técnica de optimización basada en la ampacidad de los cables, mientras que Ocłon et al. [24] utilizaron un algoritmo modificado de Jaya para optimizar el rendimiento térmico del sistema de cables de energía subterránea. Además, Perović et al. [44] han presentado una técnica de optimización que se enfoca en aumentar la ampacidad de las líneas de cableado subterráneo a través de la optimización del entorno térmico y los parámetros de diseño para cruces de cables. Estas investigaciones abren nuevas posibilidades para el desarrollo de técnicas de optimización y el uso de nuevos materiales que puedan mejorar significativamente la eficiencia energética.

La optimización multiobjetivo es un campo de investigación altamente relevante en la actualidad, especialmente para sistemas complejos. Sin embargo, a menudo se presta poca atención a la visualización del frente de Pareto, que es una herramienta esencial para la optimización de sistemas complejos. Además, a pesar de su importancia, hay una falta de estudios exhaustivos en el campo de la optimización multiobjetivo de ampacidad.

Hay varios estudios relevantes en la optimización multiobjetivo para la ampacidad de cables subterráneos. Por ejemplo, Zarchi y Vahidi [45] han propuesto un método de optimización multiobjetivo autoadaptativo para maximizar la ampacidad y minimizar el costo de los cables subterráneos. Este método ha demostrado ser efectivo para optimizar la planificación y diseño de proyectos de cableado subterráneo. Además, en [46], se ha desarrollado una fórmula para el cálculo de la capacidad de carga actual del cable de alimentación tendido en el banco de ductos, y se ha establecido una función de optimización multiobjetivo para el aumento de temperatura más bajo, utilizando un código binario reconocido por la computadora y resolviéndolo mediante el algoritmo NSGA-III. En otro estudio relevante, Ocłon et al. [47] han presentado una técnica de optimización multiobjetivo para sistemas

de cableado de energía subterráneos, utilizando objetivos como la eficiencia energética y los costos de los sistemas de cableado subterráneo.

Además, varios estudios han propuesto enfoques probabilísticos para la optimización de la ampacidad de cables eléctricos. Foty, Anders y Croall [31] proponen un enfoque probabilístico para el cálculo de la capacidad de corriente admisible de los cables, considerando el entorno y la variabilidad de las condiciones de carga. El-Cady, Radhakrishna, Horrocks y Ganton presentan en [48] otro enfoque probabilístico para el análisis térmico de los cables y el cálculo de su ampacidad. Además, Zhao, Lyall y Nourbakhsh proponen en [49] un método de cálculo de la ampacidad basado en el estudio del entorno térmico del cable y la aplicación de técnicas de probabilidad. Shabani y Vahidi también presentan un enfoque probabilístico para el cálculo óptimo de la capacidad de corriente admisible de los cables eléctricos, considerando la incertidumbre de los parámetros y las restricciones económicas en [18].

Aunque las investigaciones actuales han sido esenciales para avanzar en la optimización de la ampacidad de cables eléctricos subterráneos, aún persisten vacíos críticos en el conocimiento. Específicamente, se ha reconocido la necesidad de desarrollar un diseño de instalación y una metodología de formulación del problema de optimización que abarque enfoques monoobjetivo, biobjetivo y multiobjetivo. La carencia de un análisis exhaustivo de técnicas de optimización para problemas de tres objetivos representa otra brecha significativa.

Esta investigación tiene como propósito cerrar estas brechas mediante el desarrollo de metodologías específicas. Se incluirá la optimización monoobjetivo utilizando las técnicas PSO y GA, biobjetivo con PSO y FminCon, y multiobjetivo incorporando algoritmos como PSO, junto con la integración del método Monte Carlo. Se anticipa que los aportes adicionales de esta investigación comprenderán soluciones innovadoras, una implementación efectiva y una visualización clara y comparativa de frentes de Pareto en problemas de dos y tres objetivos, contribuyendo de manera significativa al avance en el diseño y optimización de cables subterráneos de alta tensión.

1.3 Planteamiento del Problema

En base al contexto presentado, surge la siguiente pregunta: *¿El desarrollo de metodologías precisas y eficientes permitirá optimizar la ampacidad de cables subterráneos de alta tensión, minimizando los costos de instalación y maximizando su vida útil de manera simultánea?*

Para responder a esta pregunta, es necesario abordar los siguientes problemas específicos:

1. El diseño de líneas de transmisión subterráneas de alta tensión presenta desafíos para determinar los valores óptimos para las dimensiones de la zanja, el relleno térmico y la ampacidad de los cables. El costo sustancial del relleno térmico y la necesidad de aumentar la ampacidad son factores competitivos que influyen en su uso [1, 22, 34, 50, 51]. En este contexto, *¿El desarrollo de una metodología no lineal con restricciones, utilizando algoritmo genético (GA) con reinicio adaptativo y enjambre de partículas (PSO) con función de penalización adaptativa, permitirá optimizar la ampacidad del cable y las dimensiones óptimas de la instalación de líneas de transmisión subterráneas de alta tensión?*
2. *¿El desarrollo de una optimización simultánea eficiente de la ampacidad y el costo de instalación de cables subterráneos de alta tensión, considerando restricciones específicas, mediante un enfoque biobjetivo con las técnicas FMinCon y PSO, ambos con el Método de Suma Ponderada y funciones de penalización adaptativa, permitirá determinar el frente de Pareto?* A pesar de que algunos estudios han propuesto algoritmos de optimización con función de penalización para lograr esto [18, 19, 40, 52], la determinación del frente de Pareto ha sido poco considerada, lo que podría proporcionar una idea clara de las soluciones óptimas y ayudar a elegir la mejor solución.
3. Si bien es atractivo optimizar la ampacidad y el costo de instalación de los cables simultáneamente, existen factores críticos que deben ser considerados, como la vida útil del aislamiento XLPE y la presencia de armónicos en el sistema [53, 53], los cuales dependen de variables estocásticas [14, 16, 18, 42, 54, 55]. Por lo tanto, surge la pregunta de *¿Puede el desarrollo de un enfoque que optimice simultáneamente la ampacidad, el costo de instalación y la vida útil del cable, considerando las variaciones estocásticas en el entorno ambiental y del suelo mediante la técnica de optimización PSO y el método Monte Carlo, dar lugar a una metodología más eficiente, robusta y realista?.*

1.4 Objetivo de la Investigación

El objetivo general de esta investigación es desarrollar metodologías precisas y eficientes para optimizar la ampacidad de cables subterráneos de alta tensión, minimizando los costos de

instalación y maximizando su vida útil. Para alcanzar el objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos que corresponden a problema de investigación específica en el mismo orden:

- O1** Desarrollar y aplicar una metodología no lineal con restricciones, utilizando algoritmo genético (GA) con reinicio adaptativo y enjambre de partículas (PSO) con función de penalización adaptativa, para optimizar la ampacidad del cable y determinar las dimensiones óptimas en la instalación de líneas de transmisión subterráneas de alta tensión.
- O2** Proponer y evaluar un enfoque de optimización biobjetivo para la instalación de cables subterráneos de alta tensión. Este enfoque incorpora el algoritmo de optimización FMinCon y PSO, ambos aplicados con el Método de Suma Ponderada y utilizando penalización para abordar las restricciones. Además, se busca identificar el frente de Pareto para su posterior comparación con el algoritmo gamultiobj de MATLAB.
- O3** Desarrollar una metodología de optimización multiobjetivo simultánea para la ampacidad, el costo de instalación y la vida útil del cable, teniendo en cuenta parámetros estocásticos del entorno ambiental y del suelo. Esto se logrará mediante el uso mejorado del Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) y la implementación del método Monte Carlo.

1.5 Hipótesis y Variables

1.5.1 Hipótesis

La implementación de una metodología de optimización en la instalación de cables subterráneos de alta tensión tiene el potencial de mejorar eficientemente la ampacidad, reducir costos de instalación y prolongar la vida útil del cable. Esta metodología, siendo una herramienta útil para ingenieros y diseñadores de sistemas eléctricos, permite la toma de decisiones informadas, resultando en un uso más eficiente de recursos, mayor eficiencia en el diseño y construcción de sistemas eléctricos subterráneos, y una reducción en los impactos ambientales asociados con la instalación y mantenimiento de cables de alta tensión. Se espera que la implementación de estas avanzadas técnicas de optimización logre:

1. La metodología actual, al utilizar GA y PSO, optimiza la ampacidad del cable y determina dimensiones óptimas para la instalación de líneas subterráneas de alta tensión, mejorando significativamente su eficiencia y calidad.
2. Al integrar el algoritmo de optimización PSO con el Método de Suma Ponderada, así como con FMinCon, se determina el frente de Pareto. Este enfoque de optimización biobjetivo propuesto mejora significativamente la eficiencia y la calidad de los frentes de Pareto. Al compararlo con el algoritmo gamultiobj de MATLAB, se identifica el método más efectivo. Esto facilita a los diseñadores y tomadores de decisiones la selección simplificada de una propuesta del frente de Pareto para las líneas de transmisión subterráneas de alta tensión.
3. Al desarrollar una metodología de optimización multiobjetivo simultánea para la ampacidad, el costo de instalación y la vida útil del cable, considerando parámetros estocásticos del entorno ambiental y del suelo, mediante el uso mejorado del Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) y la implementación del método Monte Carlo, se logra obtener soluciones más eficientes y equilibradas. Se espera que la combinación de estas técnicas permita abordar de manera efectiva la complejidad y las incertidumbres inherentes en el diseño de líneas de transmisión subterráneas de alta tensión, contribuyendo así al avance en la optimización de estos sistemas.

1.5.2 Variables

Se presenta la [Tabla 1.1](#), que resume las variables involucradas en la investigación. En esta tabla, se identifican las *variables independientes* como factores controlables en el diseño e instalación de cables subterráneos. La *ampacidad del cable*, el *costo de instalación* y la *vida útil del aislamiento* se consideran *variables dependientes*, siendo medidas que resultan de las decisiones tomadas con respecto a las variables independientes. La *variable interrelacionada*, o *método de optimización*, conecta las demás variables y afecta la determinación y optimización de las dimensiones de la zanja, el tipo de relleno térmico, y, por ende, la ampacidad, el costo y la vida útil del cable.

Este conjunto integral de variables aborda la optimización, considerando aspectos técnicos y económicos para obtener soluciones equilibradas.

Tabla 1.1. Variables de Investigación

Variable	Tipo	Descripción
Dimensión de la Zanja	Independiente	Representa las dimensiones de la zanja utilizada para la instalación de cables de alta tensión.
Relleno Térmico	Independiente	Indica el tipo y características del relleno térmico utilizado en la instalación de cables subterráneos.
Ampacidad del Cable	Dependiente	Refleja la capacidad máxima de corriente que un cable subterráneo puede transportar sin deterioro significativo, influenciada por la dimensión de la zanja y el tipo de relleno térmico.
Costo de Instalación	Dependiente	Representa el gasto económico asociado con la instalación de cables subterráneos, influido por factores como las dimensiones de la zanja y el tipo de relleno térmico.
Vida Útil del Aislamiento	Dependiente	Indica la duración estimada del aislamiento de los cables subterráneos antes de que se produzcan fallas o degradación. Depende de variables como la ampacidad, el costo de instalación y otros factores ambientales y de diseño.
Método de Optimización	Interrelacionada	Representa el enfoque utilizado para optimizar la instalación de cables subterráneos. Incluye algoritmos como el PSO, GA, FMinCon y gamultiobj, así como el método Montecarlo

1.6 Metodología

La metodología se ha dividido en cuatro etapas principales, como se ilustra en la Figura 1.2, para facilitar su comprensión. En la *primera etapa*, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura utilizando diversas fuentes, como bases de datos, revistas científicas, libros, estándares y proyectos, para conocer las metodologías existentes en el cálculo de la ampacidad en cables subterráneos de alta tensión y en la optimización con restricciones mediante algoritmos heurísticos y evolutivos. Esta revisión bibliográfica fue crucial para seleccionar la metodología más adecuada para abordar el problema específico de optimización de la ampacidad. A partir de estas revisiones, se optó por el modelo termoeléctrico para formular la función de ampacidad, así como el modelo de ciclo de vida del aislamiento XLPE, la función de costo de instalación y las técnicas de optimización.

En la *segunda etapa*, se formuló el problema de optimización monoobjetivo y se identificaron las restricciones físicas y económicas que debían ser consideradas. Se desarrolló una metodología de optimización no lineal utilizando el algoritmo PSO con función de pe-

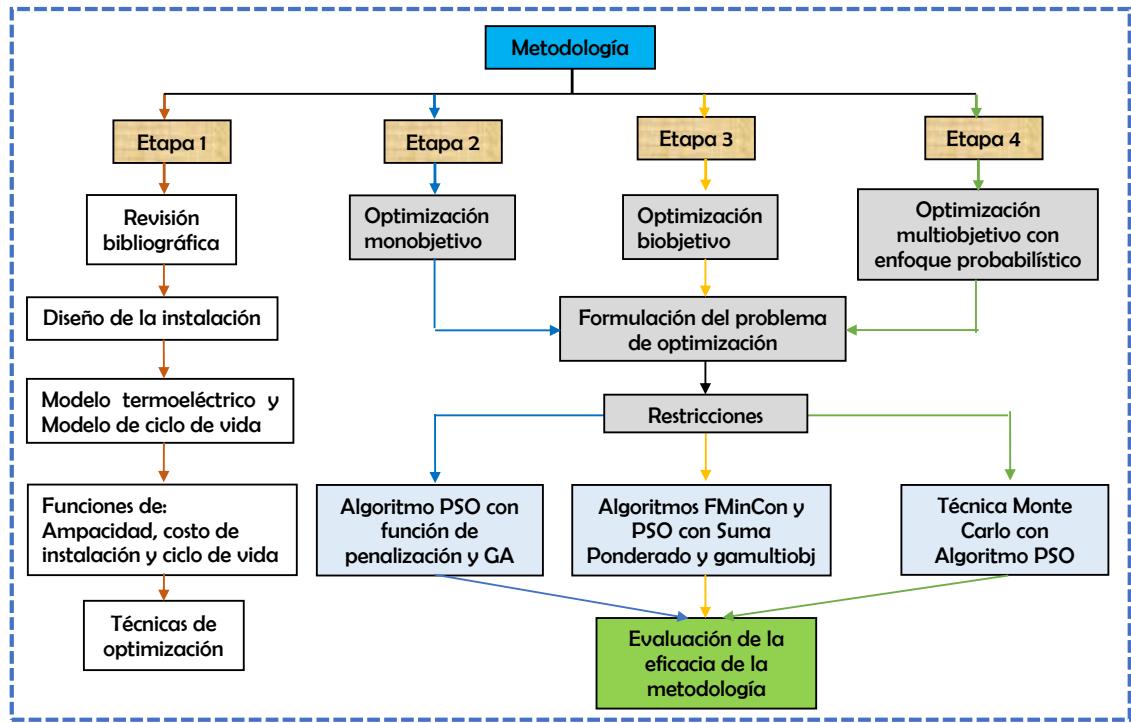


Figura 1.2. Metodología de trabajo

nalización autoadaptativa para determinar la ampacidad óptima del cable subterráneo de alta tensión. También se comparó esta metodología con el algoritmo GA para evaluar su eficacia. En la *tercera etapa*, se propuso y evaluó un enfoque de optimización biobjetivo para la instalación de cables subterráneos de alta tensión. Este enfoque combinó el algoritmo de optimización FMinCon con el Método de Suma Ponderada, así como también PSO con el mismo Método de Suma Ponderada. Luego, se realizó una comparación con el algoritmo gamultiobj de MATLAB con el propósito de identificar el frente de Pareto y obtener el conjunto de soluciones óptimas en relación a los costos de instalación y la ampacidad.

En la *cuarta etapa*, se desarrolló un enfoque de optimización multiobjetivo utilizando el algoritmo PSO con el método de suma ponderado y el enfoque probabilístico (Monte Carlo). Este enfoque permitió calcular simultáneamente la ampacidad, los costos de instalación y la vida útil del aislamiento de los cables subterráneos de alta tensión, logrando así una solución óptima y eficiente del problema de optimización.

1.7 Aspectos clave de la investigación

La optimización de la ampacidad de los cables representa un desafío significativo en la industria eléctrica. Sin embargo, la falta de una metodología precisa y eficiente para lograr

este objetivo ha sido un desafío constante para los expertos. Por lo tanto, esta investigación busca contribuir al desarrollo y aplicación de nuevas metodologías de clasificación de cables subterráneos para optimizar la ampacidad de instalación y prolongar su vida útil, teniendo en cuenta aspectos económicos.

Para abordar este propósito, se plantea el problema de optimización para una instalación trifásica con transposición regular en formación plana utilizando relleno térmico. Se propone la implementación de algoritmos de optimización como PSO, GA, gamultiobj, así como algoritmos determinísticos como FMinCon, para buscar soluciones óptimas en el espacio de búsqueda. La metodología desarrollada busca minimizar los costos de instalación sin comprometer la eficiencia, al mismo tiempo que maximiza la ampacidad del cable. Este enfoque garantiza un funcionamiento óptimo tanto en la etapa de proyecto como en la instalación de cables, en comparación con aquellas configuraciones que no utilizan relleno térmico.

Un aspecto clave es que el método propuesto es aplicable en diversas ubicaciones y tamaños de cable, siempre que se cuenten con los datos necesarios del sitio. Puede utilizarse tanto en sistemas de cables subterráneos en la etapa de proyecto como en sistemas ya existentes. En algunos casos, resulta más beneficioso invertir en el relleno térmico que en el área de sección transversal del núcleo del cable para mejorar la ampacidad. Configurando adecuadamente las dimensiones del relleno térmico y optimizando la ampacidad, es posible lograr que los cables que operan cerca de su capacidad límite sigan funcionando sin interrupciones. Esta solución eficiente es aplicable en una amplia variedad de aplicaciones y condiciones de operación.

Además, el método de optimización propuesto brinda al diseñador la opción de elegir una solución preferida del Frente de Pareto y se espera que permita ahorrar costos significativos mediante la optimización de los diseños de sistemas de cable futuros y la mejora de las instalaciones de cable existentes. Por último, la metodología también puede implementarse para un enfoque probabilístico, considerando los parámetros de incertidumbre en la fase de diseño para determinar la ampacidad y la vida útil del cable en función de un enfoque probabilístico y evitar el uso de valores deterministas.

1.8 Estructura de la tesis

La tesis doctoral se organiza en capítulos que exploran diversos aspectos:

- En el segundo capítulo, se presentan los fundamentos teóricos relacionados con los cables subterráneos, diferentes tipos de instalaciones y los modelos utilizados. Se selecciona el modelo termoeléctrico para el cálculo de la ampacidad y se introducen ecuaciones estándar. Además, se revisan metodologías numéricas alternativas y se incluye el modelo de ciclo de vida para el aislamiento del cable XLPE. El capítulo concluye con la formulación del problema de optimización y un resumen de técnicas de optimización.
- En el tercer capítulo, se aborda un caso de estudio específico, incluyendo el diseño de la instalación, la configuración del relleno térmico, y los parámetros del cable. Se presentan algoritmos de optimización mono-objetivo (PSO y GA) y se explora la optimización con y sin relleno térmico. Se formula un problema de optimización biobjetivo y se explora el método de suma ponderada con FMinCon y PSO, comparándolo con gamultiobj en MATLAB. También se desarrolla una metodología de optimización simultánea de ampacidad, costo de instalación y vida útil, considerando parámetros probabilísticos ambientales y del suelo mediante el método PSO junto con el método Montecarlo.
- En la conclusión, se presentan los hallazgos de la investigación en el mismo orden de los objetivos planteados. Se resumen los resultados obtenidos y se ofrecen posibles líneas de investigación futuras. La metodología y resultados se publicaron en un artículo de revista, proporcionando una contribución valiosa al campo de la ingeniería eléctrica.
- Apéndice A: Se incluye una solución detallada de algunos cálculos de parámetros físicos y código en Matlab.

Capítulo 2: Marco Teórico

En este capítulo, se proporciona una visión general del diseño y el procedimiento de instalación de cables que se utilizan comúnmente en la red de transmisión. Es importante destacar que esta descripción no pretende ser exhaustiva y cubrir todas las posibilidades, sino que se centra en algunas técnicas seleccionadas, tipos de cable, y en los modelos de cálculo de ampacidad y de estimación de la vida útil del aislamiento de transmisión, entre otros.

2.1 Diseño de cables para la red de transmisión

En el mercado existen diversos tipos de cables, que van desde cables de baja tensión hasta cables de alta tensión, y cada uno posee características específicas. Al momento de seleccionar un cable, es esencial considerar el tipo de aislamiento y protección adecuados, así como la ubicación y la forma en que se instalará.

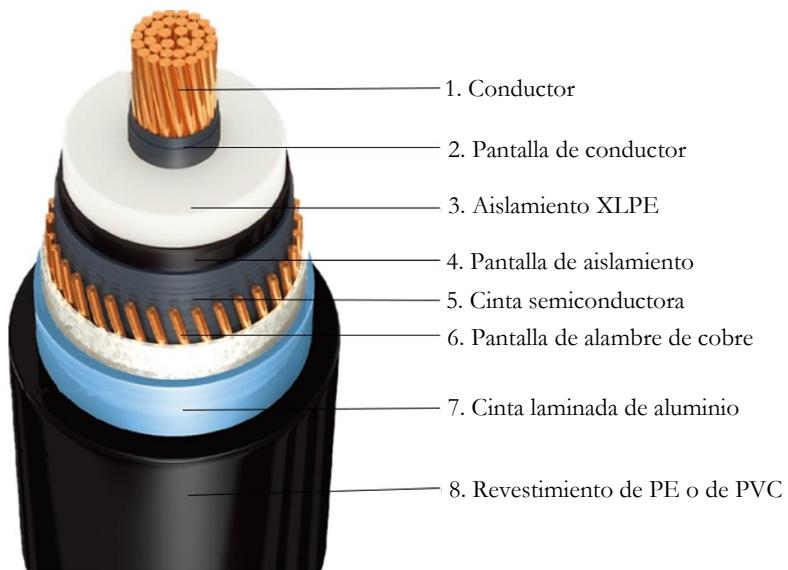


Figura 2.1. Cable subterráneo con aislamiento XLPE de alto voltaje [1].

Los cables eléctricos se componen, en general, de al menos dos componentes fundamentales: un conductor eléctrico y el aislamiento del conductor, el cual evita el contacto directo entre este y otros conductores de capas adyacentes. Sin embargo, cuando se trata de voltajes más altos, se presentan desafíos técnicos en cuanto a proporcionar un aislamiento adecuado

que permita la conducción y disipación del calor. Además, en la mayoría de los cables de alimentación, el aislamiento eléctrico primario debe protegerse contra daños mecánicos y electromecánicos, lo que requiere la adición de capas concéntricas de protección sobre el aislamiento [10].

Cada fabricante tiene diseños específicos de cables que difieren en enfoques y procesos de producción. Uno de los tipos de cables comúnmente utilizados en la red de transmisión de alta tensión es el cable de transmisión con aislamiento de polímero, como se muestra en la [Figura 2.1](#). Este tipo de cable consta de varios subcomponentes básicos, como el conductor (1), la capa semiconductora (2), el aislamiento (3), la pantalla metálica (6) y la cubierta exterior (8), cada uno con un propósito específico y opciones típicas de materiales. Algunos cables pueden tener más componentes para mejorar la eficiencia y durabilidad.

2.1.1 Conductor

Para garantizar el rendimiento óptimo y la durabilidad de los cables de transmisión eléctrica subterráneos, es esencial seleccionar el tamaño adecuado del conductor y el tipo de aislamiento. El conductor es el componente encargado de transportar la corriente eléctrica y, en la mayoría de los casos, se fabrica con cobre o aluminio. El tamaño del conductor se determina en función de la corriente que debe soportar y del dieléctrico utilizado [6, 10]. Actualmente, el aislamiento más utilizado en la fabricación de cables es el polietileno reticulado (XLPE), que ofrece una excelente resistencia mecánica y eléctrica [56]. Los fabricantes de cables producen una variedad de construcciones de conductores para adaptarse a diferentes áreas, y el tamaño de la sección transversal del conductor es proporcional a la corriente que lo atraviesa, atraviesa, como se muestra en la [Figura 2.2](#). Es importante destacar que, en la práctica, los conductores no se fabrican en áreas precisas, sino que los fabricantes ajustan los tamaños de los cables y los procesos de fabricación para cumplir con una resistencia máxima especificada en lugar de un área [10]. En cuanto a la elección entre cobre o aluminio, ambos materiales presentan ventajas e inconvenientes. El cobre tiene la ventaja de tener una mayor resistencia a la tracción y una menor resistividad que el aluminio, lo que resulta en una sección transversal más pequeña para la misma corriente. Sin embargo, el aluminio tiene una densidad más baja que el cobre, lo que hace que un cable de aluminio sea aproximadamente tres veces más liviano que un cable de cobre con la misma capacidad de corriente [6]. Aunque el aluminio es significativamente más barato que el cobre, los ahorros que se

obtienen al utilizar aluminio son relativamente pequeños, ya que el costo del conductor es solo una fracción del costo total del sistema [2]. En última instancia, la elección entre cobre o aluminio dependerá del precio y de otros factores relevantes, como el peso y la resistencia mecánica.

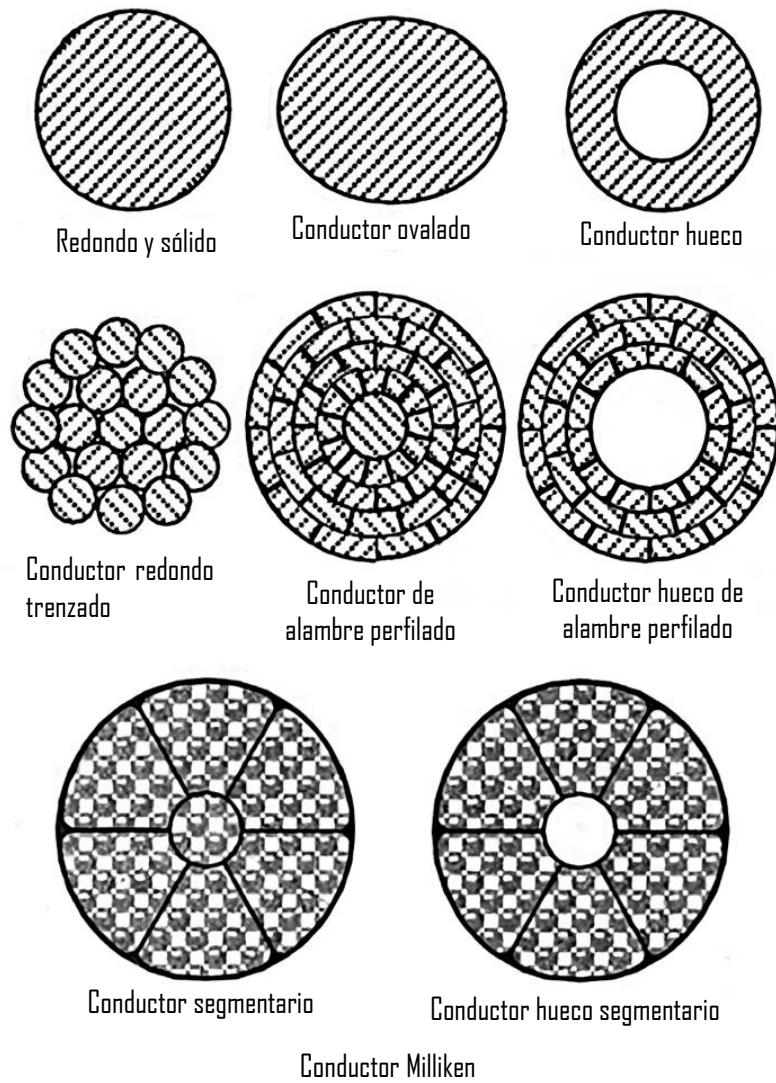


Figura 2.2. Construcciones típicas de conductores de cable subterráneo [2, 3].

Actualmente, el conductor Milliken es utilizado en aplicaciones de alta corriente debido a su capacidad para reducir significativamente el efecto piel en conductores de gran tamaño para corriente alterna (Figura 2.2). Este tipo de conductor fue diseñado por H. Milliken en la década de 1930 para reducir el efecto piel y mejorar la capacidad de transporte de corriente de los conductores de gran tamaño para corriente alterna. Aunque los costos de producción son más altos, el conductor Milliken se utiliza comúnmente en secciones transversales grandes de conductores de cobre ($\geq 1200 \text{ mm}^2$, como se observa en la Figura 2.3) debido a su capacidad para reducir significativamente el efecto piel [2].

2.1.2 Aislamiento

El aislamiento es uno de los componentes más críticos en la construcción de un cable, ya que su función es garantizar la ausencia de conexiones eléctricas entre el conductor y la pantalla del cable, y asegurar un campo eléctrico uniforme. Por esta razón, el aislamiento debe ser capaz de soportar el campo eléctrico del cable tanto en condiciones de estado estable como transitorio, sin sufrir fallas dieléctricas que puedan causar un cortocircuito.

A lo largo de la historia, el aislamiento utilizado fue principalmente papel impregnado en líquido [10], pero en años recientes, debido a cuestiones ambientales, ha sido sustituido por polímeros extruidos. Entre los polímeros más comunes, el XLPE es el que se utiliza en la mayoría de los cables HV producidos en la actualidad [11, 56, 57]. Además, el aislamiento XLPE tiene la ventaja de operar a una temperatura máxima de estado estable de 90°C, en comparación con los 60°C del aislamiento de papel, lo que permite transmitir más potencia para el mismo conductor.

Otro aspecto importante a considerar en el material aislante es su resistividad térmica, ya que un buen aislante debe tener una baja resistividad térmica y resultar en bajas pérdidas dieléctricas, lo que hace del XLPE un excelente material aislante. En los métodos comunes de instalación de cables enterrados directamente en zanjas, se usan cables con un aislamiento más grueso, como se muestra en la [Figura 2.3](#).

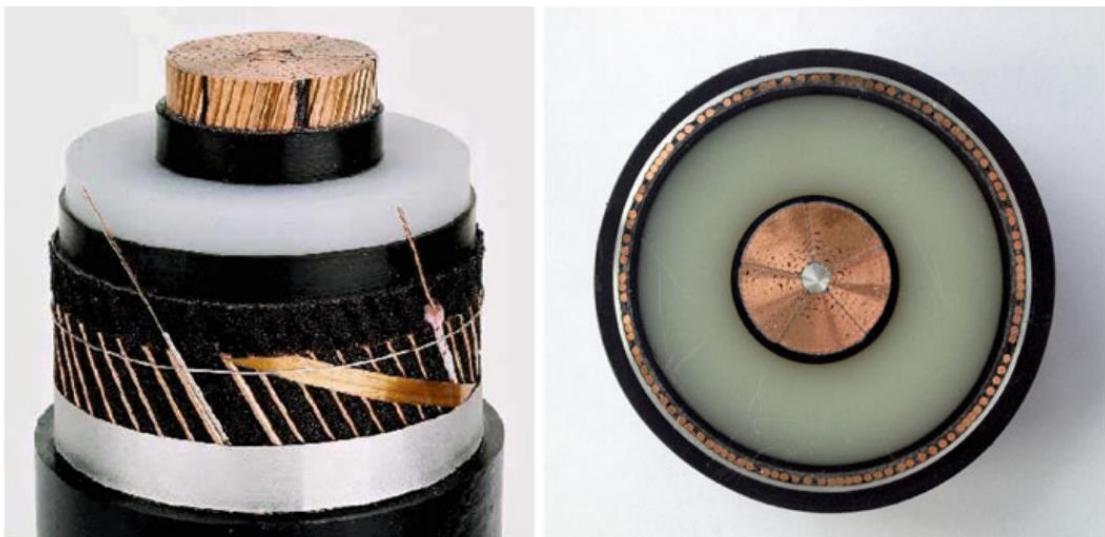


Figura 2.3. Cable de 400 kV con aislamiento XLPE reticulado y conductor de cobre de 1200 mm², que tienen una capacidad de 600 MVA sin refrigeración forzada y 1050 MVA con refrigeración forzada [4].

2.1.3 Pantalla

El blindaje o pantalla es una capa adicional que se agrega alrededor del aislamiento de los cables subterráneos de alta tensión para proteger el campo eléctrico y el aislamiento. El blindaje puede ser de dos tipos: metálico o semiconductor. El blindaje metálico se compone de una lámina o malla de cobre o aluminio que cubre el aislamiento, mientras que el blindaje semiconductor es una capa de material semiconductor aplicada directamente sobre el aislamiento. El blindaje semiconductor es preferible al metálico debido a su capacidad para reducir la tensión eléctrica en el aislamiento y, por lo tanto, mejorar la vida útil del cable [58, 59].

Además, algunas vainas corrugadas también se utilizan como blindaje adicional para proteger los cables contra daños mecánicos y ambientales, como la humedad y la corrosión [4]. Estas vainas corrugadas también pueden ser de dos tipos: metálicas o no metálicas. Las vainas corrugadas metálicas están hechas de láminas de acero o aluminio corrugadas, mientras que las no metálicas pueden ser de polietileno de alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC) o polipropileno (PP).

2.1.4 Capas semiconductoras

Las capas semiconductores se utilizan para asegurar un campo eléctrico cilíndrico en los cables de alta tensión y para evitar la formación de huecos o vacíos entre el conductor, el aislamiento y el blindaje metálico, evitando así la aparición de descargas parciales [6]. Estas capas también ayudan a reducir el estrés eléctrico en los puntos de terminación del cable y aumentan la capacidad de carga del cable [58].

En la actualidad, se están utilizando materiales con una mayor conductividad en las capas semiconductores para mejorar su eficacia en la reducción de descargas parciales. Además, se están estudiando nuevas tecnologías de capas semiconductores, como las capas semiconductores nanoestructuradas, que pueden ofrecer un mejor rendimiento y una mayor durabilidad [60]. También se están investigando materiales alternativos, como las capas semiconductores basadas en nanotubos de carbono y grafeno, que tienen propiedades excepcionales de conductividad eléctrica y pueden ser más sostenibles que los materiales utilizados actualmente [61].

2.1.5 Revestimiento externo

El revestimiento externo es una capa crítica en la construcción de cables subterráneos de alta tensión, ya que debe proporcionar protección mecánica y ambiental al cableado interno [58]. En la actualidad, los materiales más comunes utilizados para el revestimiento externo son los polímeros termoestables y termoplásticos.

Entre los polímeros termoestables se encuentra la poliolefina reticulada (XLPE), que ha demostrado ser un material duradero y resistente en aplicaciones de alta tensión. Además, el XLPE tiene una excelente resistencia al ozono y al envejecimiento térmico, lo que lo hace adecuado para su uso en entornos hostiles. Los polímeros termoplásticos, como el polietileno (PE) y el cloruro de polivinilo (PVC), también se utilizan como revestimiento externo en cables subterráneos de alta tensión.

Sin embargo, el uso de polímeros termoplásticos en cables de alta tensión se ha reducido en los últimos años debido a sus limitaciones en cuanto a la resistencia térmica y la durabilidad. Los polímeros termoestables como el XLPE se han convertido en una opción preferida debido a su alta resistencia térmica y a su capacidad para soportar altas temperaturas sin degradarse.

Es importante tener en cuenta que, además del material del revestimiento externo, también se debe considerar el grosor de la capa de revestimiento, ya que esto afectará la clasificación del cable. Una capa de revestimiento más gruesa proporciona una mayor protección, pero también aumenta la resistencia térmica del cable, lo que puede limitar su capacidad de transmisión de energía [58].

2.2 Instalaciones y Configuraciones

Las configuraciones más comunes de cables subterráneos de alta tensión incluyen las siguientes opciones:

- *Tipo trébol*: también conocida como configuración de haz, esta disposición utiliza tres o más cables de potencia de alta tensión dispuestos en forma de trébol. En la Figura 2.4 a se muestra la configuración típica, aunque en algunos proyectos incluso los tres cables están separados. Esta configuración se utiliza principalmente en aplicaciones de transmisión de alta tensión a larga distancia [2, 3, 5].

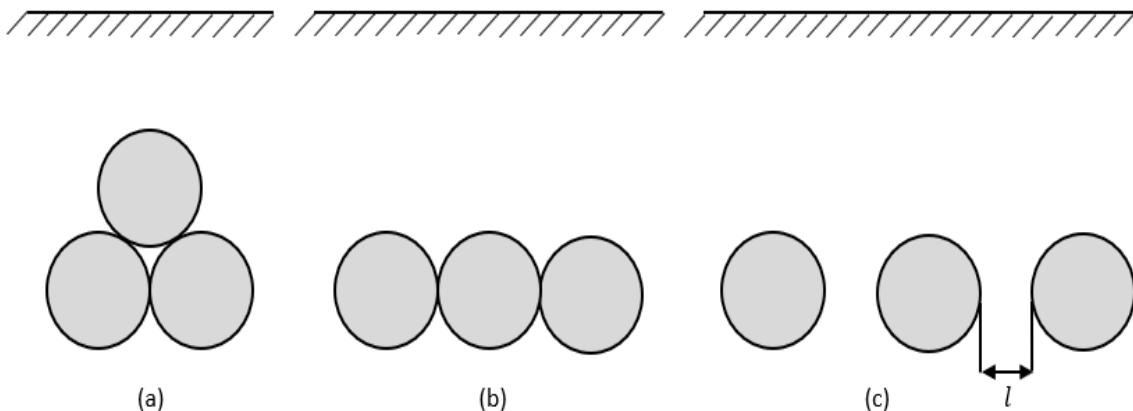


Figura 2.4. Instalaciones típicas de cables directamente enterrados.

- *Tipo plana:* esta configuración utiliza tres cables de potencia de alta tensión dispuestos en forma plana y separados uniformemente, tal como se muestra en la Figura 2.4 b y c. Esta disposición se utiliza comúnmente en aplicaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica de alta tensión [3, 5, 10].

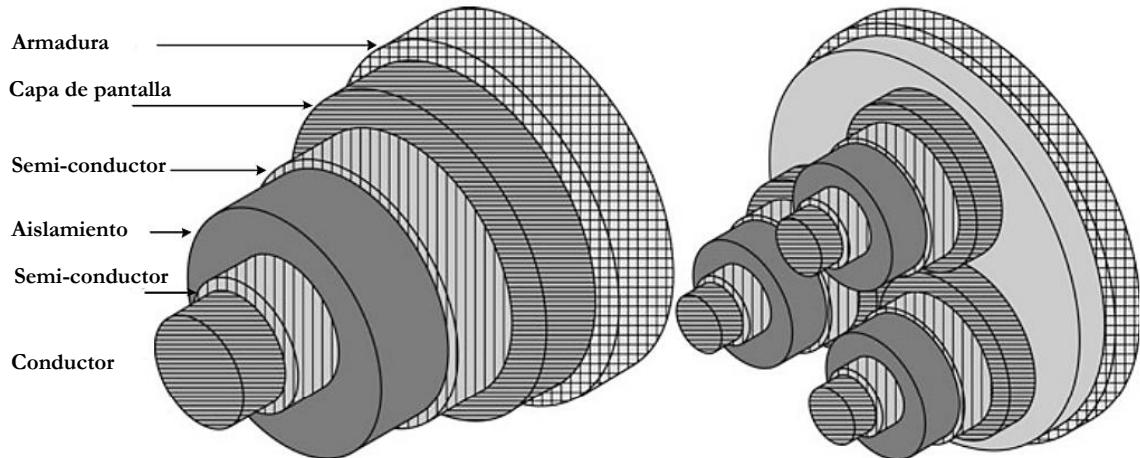


Figura 2.5. Cable típico de núcleo único de XLPE y un cable tipo tubo típico.

- *Configuración de cable tipo tubo:* La configuración de cable tipo tubo es una alternativa comúnmente empleada en la transmisión de energía eléctrica de alta tensión en áreas urbanas densamente pobladas. Este tipo de sistema de cableado utiliza uno, dos o tres cables de potencia de alta tensión, los cuales están dentro de un tubo paquetado y aislado con un gas o aceite. La Figura 2.5 muestra un ejemplo de un cable XLPE de un solo núcleo y un cable tipo tubo típico. El uso de esta configuración permite una mayor eficiencia en la transmisión de energía eléctrica, ya que evita las interferencias entre los cables.

cias electromagnéticas y otros efectos indeseables que pueden presentarse en entornos urbanos.

Las configuraciones de instalación típicas de un circuito trifásico compuesto por cables unipolares tendidos directamente en el suelo se muestran en la [Figura 2.6](#). Existen dos tipos de configuraciones de cable de alimentación que dependen de varios factores, como el método de unión de la pantalla, el área de la sección del conductor y el espacio disponible para la instalación [10].

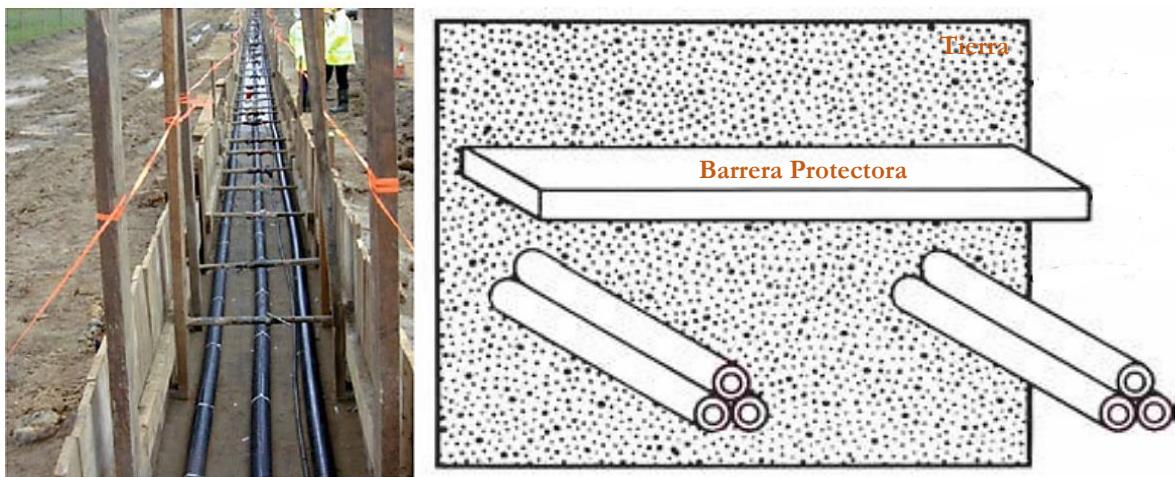


Figura 2.6. Izquierda: un sistema de cable enterrado directamente en el suelo [4]; Derecha: entierro directo para cables triplexados [5].

En algunos países, se establecen distancias mínimas entre el cable clasificado y la fuente de calor externa, que varían entre 20 y 50 cm [10, 62]. En el caso de los cables de alto voltaje, la mayoría de las empresas de servicios públicos toman medidas especiales para reducir el efecto de calentamiento mutuo. Existen varias formas de instalar cables subterráneos y, algunos métodos de instalación comunes incluyen:

Rellenos térmicos - En la [Figura 2.7](#) se ilustra un ejemplo de instalación de un circuito de cables en un relleno térmico. El relleno utilizado en la instalación cuenta con propiedades especiales, como una mayor capacidad de conducción térmica en comparación con el suelo natural. Esto se traduce en una conductividad térmica dos o más veces superior a la del suelo circundante, lo que permite alcanzar valores nominales de corriente más elevados [1, 7].

Enfriamiento forzado - Existen diversas alternativas para aplicar el método de enfriamiento forzado, entre las cuales se incluyen: el flujo de fluido en el conductor central con enfriamiento natural en el suelo ([Figura 2.8 a](#)), el enfriamiento forzado con las tuberías de agua ubicadas fuera de los cables ([Figura 2.8 b](#)) y la refrigeración forzada con agua en las

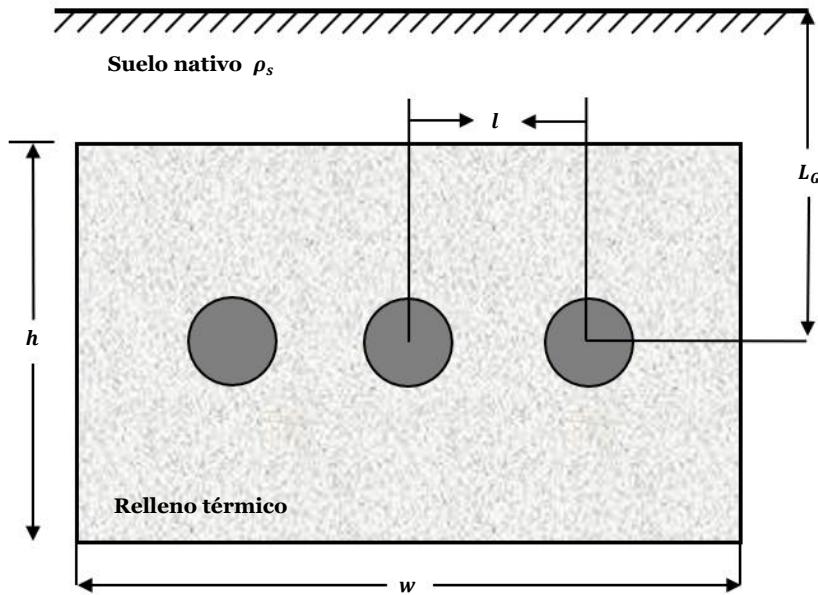


Figura 2.7. Cables instalados en relleno.

tuberías que contienen los cables (Figura 2.8 c). Las ampacidades de cada sistema varían para una misma profundidad de enterramiento, siendo las Figura 2.8 b y 2.8 c las que transportan mayor potencia en comparación con la Figura 2.8 a. No obstante, el cálculo de las capacidades de los cables en presencia de enfriamiento forzado resulta bastante complejo y, por lo tanto, no será discutido en esta tesis. Si bien se han abordado algunos aspectos del enfriamiento forzado en las referencias [63, 64, 65, 66, 67], su implementación requiere un análisis detallado para garantizar su correcto funcionamiento.

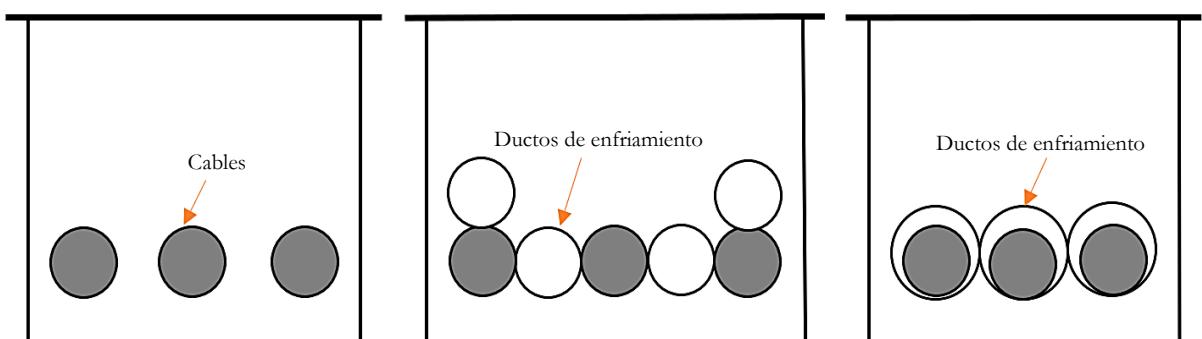


Figura 2.8. Enfriamiento forzado de un cable lleno de fluido a baja presión.

Banco de conductos - El banco de conductos es una solución frecuente en la construcción urbana para alojar una gran cantidad de circuitos de cables en una zanja. Se trata de una estructura de hormigón especial con ductos uniformemente espaciados que protegen los cables del colapso debido al movimiento del suelo y previenen excavaciones accidentales

[5]. En cada orificio se coloca un tubo de plástico, generalmente de polietileno o PVC, que permite la instalación y remoción eficiente de los circuitos. Es importante tener en cuenta que los cables instalados en tuberías tienen una capacidad de conducción de corriente menor que los cables enterrados directamente con el mismo tamaño de conductor y operando al mismo nivel de voltaje. Esto se debe a la proximidad de los núcleos y las pérdidas generadas en la tubería de acero, según [10]. En la [Figura 2.9 Izquierda](#) se ilustra una instalación típica de dos circuitos en un banco de conductos, donde se pueden observar varios conductos vacíos en la caja de chis, lo que permite la instalación de circuitos adicionales en el futuro.

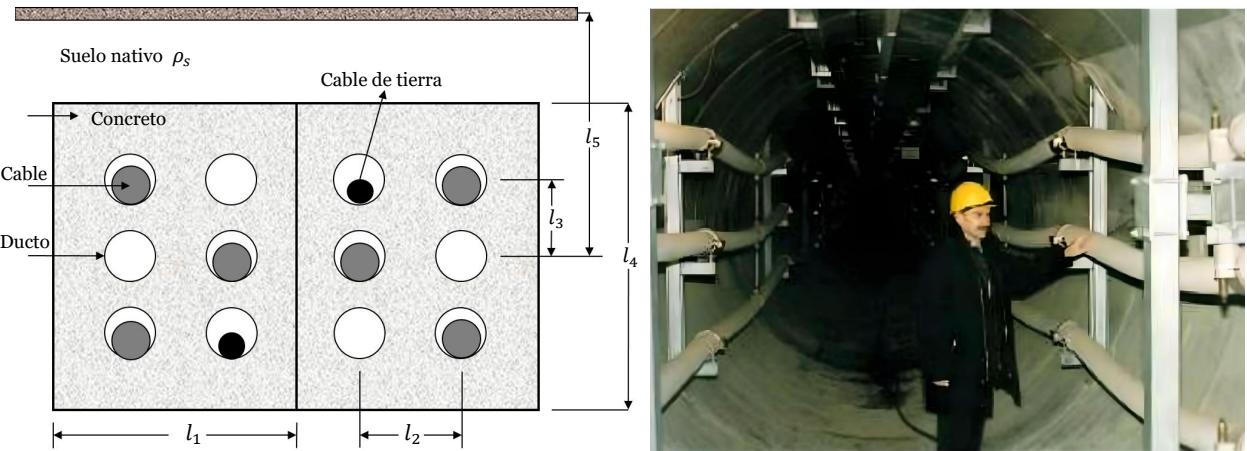


Figura 2.9. Izquierda: Dos circuitos en un banco de conductos; Derecha: dos sistemas de cable XLPE de 400 kV en un túnel ventilado [4].

Túneles con ventilación - La instalación de cables en túneles con ventilación es una práctica habitual en diversos ámbitos, como en el transporte, infraestructuras subterráneas de servicios públicos y en algunos sectores industriales. Los túneles con ventilación, como se muestra en la [Figura 2.9 Derecha](#), suelen tener una infraestructura más compleja que otros tipos de túneles, con sistemas avanzados de ventilación mecánica, monitoreo de sensores y control de iluminación y temperatura. En este contexto, la instalación de cables subterráneos es una forma segura y eficiente de suministrar energía eléctrica y datos a estos sistemas, así como a otros equipos eléctricos necesarios en el túnel.

2.2.1 Técnicas de unión

En estado estable, cuando la corriente fluye a través del núcleo de un cable, se genera una tensión en la pantalla del mismo. Si se forma un circuito cerrado, la corriente circulará a través de la pantalla, lo que aumentará las pérdidas del sistema. Por lo tanto, es crucial

mantener la corriente en la pantalla lo más baja posible. Las pantallas de los cables trifásicos se instalan típicamente en una de tres configuraciones de conexión:

- Unión de un solo extremo: conexión a tierra de las pantallas en un solo extremo;
- Unión en ambos extremos: conexión a tierra de las pantallas en ambos extremos;
- Unión cruzada: conexión a tierra de las pantallas en ambos extremos, con transposición de las pantallas entre los extremos.

En un sistema conectado de un solo extremo, se evita el efecto considerable de calentamiento de las corrientes circulantes, pero se inducirán voltajes a lo largo de la longitud del cable. Estos voltajes son proporcionales a la corriente del conductor y la longitud del cable, y aumentan a medida que aumenta el espaciamiento del cable [6, 7, 8]. Se debe tener especial cuidado para aislar y proporcionar protección contra sobretensiones en el extremo libre de la pantalla para evitar peligros de los voltajes inducidos. Una forma de eliminar los voltajes inducidos es conectar la pantalla en ambos extremos de la carrera (conexión sólida) [7]. La desventaja de esto es que las corrientes circulantes que luego fluyen en las pantallas reducen la capacidad de transporte de corriente del cable. La conexión cruzada es una técnica utilizada para evitar corrientes circulantes y voltajes excesivos en las pantallas, permitiendo una mayor separación entre los cables y longitudes de carrera más largas. Al aumentar la separación entre los cables, se logra una mayor independencia térmica de cada uno, lo que a su vez aumenta su capacidad de transporte de corriente. La conexión cruzada divide la longitud del cable en tres secciones y conecta las pantallas en una disposición cruzada de tal manera que los voltajes inducidos se cancelan [6, 7]. Es importante destacar que este sistema es muy costoso y se utiliza principalmente en instalaciones de alta tensión .

En la [Figura 2.10](#) se muestra una representación esquemática de las conexiones cruzadas. La ruta del cable se divide en tres longitudes iguales y la continuidad de la pantalla se interrumpe en cada unión. Los voltajes de la pantalla inducidos en cada sección de cada fase son iguales en magnitud y desfasados 120° . Al conectar las pantallas en cruz, como se muestra en la figura, cada circuito de pantalla contiene una sección de cada fase de tal manera que el voltaje total en cada circuito de pantalla se suma a cero. Si las pantallas se conectan a tierra y se unen al final de la carrera, el voltaje neto en el bucle y las corrientes circulantes serán cero, y las únicas pérdidas de cubierta serán las causadas por corrientes de Foucault.

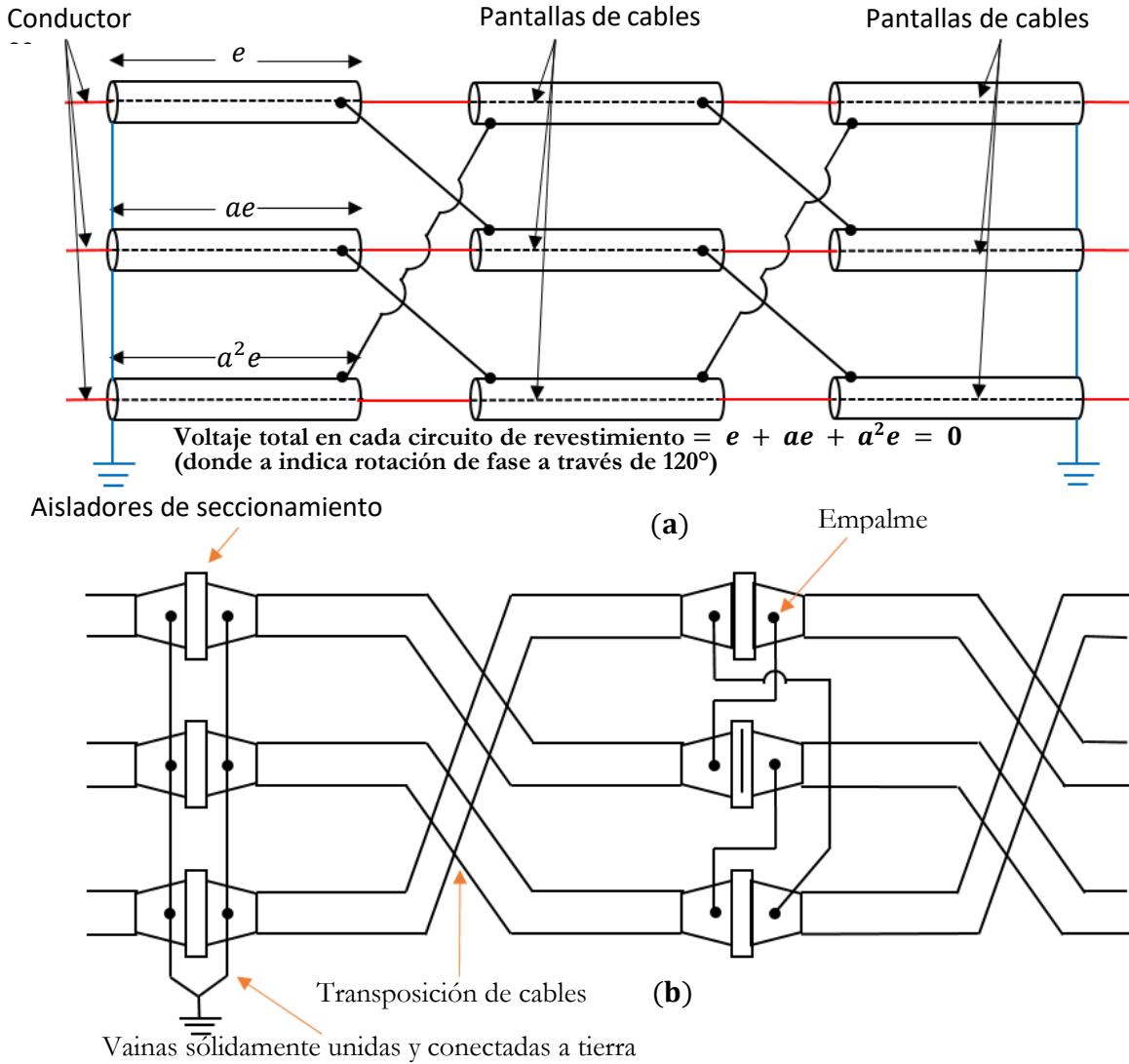


Figura 2.10. Representación esquemática de un sistema de cables con conexión cruzada. (a) Los cables no están transpuestos. (b) Los cables están transpuestos [6, 7, 8].

La transposición de los cables es una técnica utilizada para minimizar las interferencias electromagnéticas y reducir las pérdidas de energía en cables de alta tensión. En un cable transpuesto, los conductores se intercambian de posición a intervalos regulares a lo largo de la longitud del cable. Esto ayuda a reducir la capacitancia y la inductancia entre los conductores, mejorando la distribución de la corriente y reduciendo las interferencias electromagnéticas [68].

2.3 Cálculos de ampacidad de cables subterráneos

En la literatura se discute ampliamente el cálculo de la ampacidad de los cables de energía eléctrica, la cual representa la corriente máxima que un cable puede soportar antes de sobre-

calentarse [10]. Dos asociaciones internacionales importantes que han adoptado el enfoque analítico basado en el modelo de Neher y McGrath para el cálculo de la ampacidad son el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [7, 12, 69, 70]. Ambos estándares tienen procedimientos de cálculo similares, aunque el método IEC incorpora varios desarrollos nuevos posteriores a la publicación del documento de [71]. En esta sección se revisarán las ecuaciones resultantes de los principios de transferencia de calor para cables enterrados aplicando ambos estándares.

2.3.1 Mecanismo de transferencia de calor

En los cálculos de ampacidad del cable, la determinación de la temperatura del conductor para una carga de corriente determinada o la determinación de la ampacidad para una temperatura de conducción establecida son tareas fundamentales [7]. Para llevar a cabo estas tareas, se requiere calcular el calor generado dentro del cable y la velocidad de disipación del calor lejos del conductor para un material conductor específico y una carga dada. La capacidad del medio circundante para disipar el calor es un factor crítico en estas determinaciones, y varía ampliamente debido a factores como la composición del suelo y el contenido de humedad, la temperatura ambiente y las condiciones del viento. La transferencia de calor a través del cable y sus alrededores se produce de varias formas, las cuales se describen a continuación.

2.3.1.1 Conducción

La conducción es un mecanismo de transferencia de calor importante para las instalaciones subterráneas. El calor se transfiere por conducción desde el conductor y otras partes metálicas, así como desde el aislamiento. Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor mediante ecuaciones de flujo apropiadas, que se utilizan para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. En el caso de la conducción de calor, la ecuación de flujo se conoce como la ley de Fourier [72].

Para una pared con una distribución de temperatura $\theta(x)$, la ecuación de flujo se expresa como

$$q = -\frac{A}{\rho} \frac{d\theta}{dx} \quad (2.1)$$

donde el flujo de calor q (W/m^2) es el flujo de transferencia de calor en la dirección x por

unidad de área perpendicular a la dirección de transferencia. Este flujo es proporcional al gradiente de temperatura $d\theta/dx$ en esa dirección. La constante de proporcionalidad ρ es una propiedad de transporte denominada resistividad térmica ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$), la cual es característica del material. Es importante destacar que el signo negativo en la fórmula es una consecuencia de que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente. La variable A corresponde al área unitaria (por naturaleza cualquier área).

2.3.1.2 Convección

La transferencia de calor en cables subterráneos implica diversos mecanismos, incluyendo la convección y la radiación térmica. En condiciones húmedas o con corrientes de aire, la convección puede transportar calor del cable al suelo circundante. En estos casos, el calentamiento del suelo puede generar corrientes de convección que llevan el calor hacia el suelo.

Independientemente de la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación apropiada es de la forma:

$$q = h(\theta_s - \theta_{amb}) \quad (2.2)$$

donde q es el flujo de calor por convección (W/m^2), que es proporcional a la diferencia entre la temperatura superficial del cable (θ_s) y la temperatura ambiente (θ_{amb}). Esta expresión se conoce como la ley de enfriamiento de Newton y la constante de proporcionalidad h ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección.

2.3.1.3 Radiación

Se ha demostrado que la radiación térmica puede contribuir significativamente a la transferencia de calor en cables subterráneos, especialmente en suelos secos y arenosos. La radiación térmica es el proceso de transferencia de calor mediante el cual la energía térmica se transfiere a través de ondas electromagnéticas. En el caso de los cables subterráneos, la radiación térmica puede tener lugar entre la superficie de los cables y el suelo circundante [7, 73].

El flujo de calor emitido por una superficie de cable está dado por la ley de Stefan-Boltzmann::

$$q = \epsilon\sigma_B(\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}) \quad (2.3)$$

donde ϵ es la emisividad de la superficie del cable, σ_B es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$), A es el área de la superficie del cable expuesta al suelo, θ_s^* es la temperatura absoluta (K) de la superficie del cable y θ_{amb}^* es la temperatura del suelo circundante.

En los cables subterráneos, la tasa total de transferencia de calor desde la superficie del cable está dada por la suma de las tasas de calor debidas a la convección y radiación térmica, como se expresa en la ecuación:

$$W = hA_s(\theta_s - \theta_{amb}) + \epsilon\sigma A_{sr}(\theta_s^{*4} - \theta_{amb}^{*4}) \quad (2.4)$$

donde A_s es el área convectiva por metro de longitud y A_{sr} es el área efectiva de radiación por metro de longitud.

2.3.1.4 Ecuaciones de balance energético

En el análisis de la transferencia de calor en un sistema de cable, la ley de conservación de la energía juega un papel importante. Para garantizar la conservación de la energía en cualquier instante, es necesario que exista un equilibrio entre todas las tasas de energía medidas en J/s. Esta ley se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$W_{ent} + W_{int} = W_{out} + \Delta W_{st} \quad (2.5)$$

donde W_{ent} es la tasa de energía que ingresa al cable, la cual puede provenir de otros cables cercanos o de la radiación solar. Por otro lado, W_{int} corresponde a la tasa de calor generado internamente en el cable, ya sea por pérdidas dieléctricas o por la conversión de energía eléctrica en calor (efecto Joule). Además, ΔW_{st} representa la tasa de cambio de energía almacenada dentro del cable. Por último, W_{out} corresponde a la velocidad a la que la energía se disipa a través de la conducción, convección y radiación.

2.3.2 Ecuaciones de transferencia de calor

En el análisis de la transferencia de calor en un sistema de cable, es crucial tener en cuenta la generación de calor debido a la corriente que fluye a través del conductor del cable. Este calor generado se disipa a través del aislamiento, la cubierta metálica y las porciones del cable en contacto con el medio circundante. La capacidad de corriente admisible del cable,

también conocida como ampacidad, depende en gran medida de la eficacia de este proceso de disipación y de los límites de temperatura del aislamiento.

Para comprender la naturaleza del proceso de disipación de calor, es necesario aplicar las ecuaciones de transferencia de calor pertinentes. En el caso de un cable subterráneo enterrado en un suelo homogéneo, la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción a través de los componentes del cable y el suelo circundante. Dado que la longitud del cable es mucho mayor que su diámetro, los efectos tridimensionales se pueden despreciar y el problema se puede formular en dos dimensiones.

La conducción de calor en el suelo en coordenadas cartesianas se puede describir mediante la ecuación de calor en su forma diferencial [7, 72]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + W_{int} = c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.6)$$

donde,

ρ = resistividad térmica, K·m/W

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$ = gradiente de temperatura en dirección x

c = capacidad volumétrica del material térmico, J/m³·K

Esta ecuación es fundamental para modelar el flujo de calor en el suelo y, por lo tanto, para calcular la temperatura del suelo y del cable. La solución a esta ecuación puede utilizarse para estimar la temperatura del cable en cualquier punto a lo largo de su longitud y, por lo tanto, para determinar si se están cumpliendo los límites de temperatura del aislamiento.

Existen dos métodos diferentes para resolver la [ecuación 2.6](#): el método analítico y el método numérico [74]. El método analítico produce soluciones exactas en una forma matemática cerrada, pero tiene limitaciones para problemas complejos y realistas. En cambio, el método numérico requiere iteraciones para obtener soluciones aproximadas, pero es más flexible y permite analizar sistemas de cable complejos y aplicar condiciones de límite más realistas.

Una solución práctica al problema de disipación de calor es aprovechar la similitud fundamental entre el flujo de calor debido a la diferencia de temperatura entre el conductor y su medio circundante y el flujo de corriente eléctrica causado por una diferencia de potencial [7]. Ante las complicaciones del problema de ampacidad, Neher y McGrath encontraron una solución práctica en 1957 [74]. El método Neher-McGrath, todavía se utiliza y es la base de las normas IEEE y IEC [12, 70]. La figura 1 muestra la red de escalera del equivalente

térmico-eléctrico del cable y el medio circundante del cable enterrado.

2.3.3 Analogías de red eléctrica y Red Térmica

El método para resolver el problema de disipación de calor en cables subterráneos utiliza una analogía entre el flujo de calor y el flujo de corriente eléctrica. El objeto físico se divide en volúmenes, cada uno representado por una resistencia térmica y una capacitancia. La resistencia térmica impide el flujo de calor, mientras que la capacitancia térmica almacena calor. El circuito térmico se modela como un circuito eléctrico análogo, donde las diferencias de potencial son equivalentes a las temperaturas y las corrientes son equivalentes a los flujos de calor. Si las características térmicas no cambian con la temperatura, el circuito es lineal y el principio de superposición se aplica para resolver el problema de flujo de calor. La ley de Ohm es análoga a la ley de Fourier en un circuito térmico. La analogía térmica utiliza la misma formulación que las redes eléctricas para resistencias y capacitancias, pero no existe una analogía térmica con la inductancia o en el análisis de estado estacionario, solo aparece la resistencia en la red.

2.3.3.1 Resistencia térmica

En un cable, los materiales no conductores crean una resistencia al flujo de calor. La resistencia térmica de las partes metálicas en el cable es generalmente despreciable. La resistencia térmica de una capa cilíndrica con resistividad térmica constante ρ_{th} puede calcularse considerando los radios interno r_1 y externo de la capa r_2 . La capa de aislamiento en los cables es un ejemplo de este tipo de capa. La resistencia térmica para la conducción puede ser determinada de la siguiente manera [72, 75]:

$$T = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.7)$$

Para una pared rectangular, tenemos

$$T = \rho_{th} \frac{l}{S} \quad (2.8)$$

donde,

ρ_{th} = resistividad térmica de un material, K·m/W

S = área de sección transversal del cuerpo, m²

l = espesor del bloque, m

Del mismo modo, para la conducción eléctrica en el mismo sistema, la ley de Ohm proporciona una resistencia eléctrica de forma

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \rho_{el} \frac{l}{S}$$

En analogía con las redes eléctricas y térmicas, también podemos escribir que

$$W = \frac{\Delta\theta}{T} \quad (2.9)$$

que es el equivalente térmico de la ley de Ohm [10]. Una resistencia térmica también puede estar asociada con la transferencia de calor por convección en una superficie. De la ley de enfriamiento de Newton (ecuación 2.2).

$$W = h_{conv} A_s (\theta_e - \theta_{amb}) \quad (2.10)$$

donde A_s es el área de la superficie exterior del cable por unidad de longitud, h_{conv} es el coeficiente de convección de la superficie del cable y θ_e es la temperatura de la superficie del cable. La resistencia térmica para la convección puede calcularse como:

$$T_{conv} = \frac{\theta_e - \theta_{amb}}{W} = \frac{1}{h_{conv} A_s} \quad (2.11)$$

2.3.3.2 Capacitancia térmica

Los problemas relacionados con la clasificación de cables a menudo dependen del tiempo, y para determinar cómo cambia la distribución de temperatura dentro del cable y su entorno en función del tiempo, se puede utilizar la ecuación 2.6. Sin embargo, obtener soluciones analíticas de esta ecuación en la mayoría de los casos prácticos es muy difícil, por lo que se prefiere un enfoque más simple. Uno de estos enfoques es el método de capacitancia agrupada [10], que se utiliza cuando los gradientes de temperatura dentro de los componentes del cable son pequeños. Para cumplir con el requisito de que el gradiente de temperatura dentro del cuerpo sea pequeño, algunos componentes del sistema de cable, como el aislamiento y el suelo circundante, deben dividirse en entidades más pequeñas. Para hacer esto, se utiliza una teoría desarrollada por [76], cuya aplicación se revisa brevemente en [10].

Como se mencionó anteriormente, una red térmica equivalente solo contiene resistencias térmicas T y capacidades térmicas Q . La capacidad térmica Q se puede definir como la capacidad de almacenar calor y se puede calcular utilizando la ecuación:

$$Q = V \cdot c \quad (2.12)$$

donde V es el volumen del cuerpo en m^3 y c es el calor específico volumétrico del material en $\text{J/m}^3 \cdot \text{K}$.

Como ilustración, la fórmula para la capacidad térmica de una configuración coaxial con diámetros interno y externo D_i y D_o (m), respectivamente, que puede representar, por ejemplo, un aislamiento cilíndrico, se da por:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot c \quad (2.13)$$

Las capacidades y resistencias térmicas se utilizan para construir una red térmica en escalera para obtener la distribución de temperatura dentro del cable y su entorno en función del tiempo.

2.3.4 Pérdidas en los parámetros eléctricos

2.3.4.1 Pérdidas de energía en el conductor

La resistencia en un conductor eléctrico es una característica física natural que genera la mayoría de las pérdidas en el sistema de energía. Esta resistencia convierte la energía eléctrica en energía térmica, disipándose en el entorno. Las pérdidas, conocidas como pérdidas por efecto Joule (W_c en W/m), se calculan mediante la ecuación $W_c = I^2 R_{ac}$, donde I es la corriente y R_{ac} es la resistencia de CA a la temperatura de funcionamiento del conductor [7]. La resistencia de CA es mayor que la de corriente continua (DC), principalmente debido al efecto piel y de proximidad [10]. Por lo tanto, es fundamental mantener R_{ac} lo más baja posible mediante un diseño cuidadoso de la fabricación del conductor.

a) Resistencia DC del conductor del cable

La relación entre la resistencia de DC por unidad de longitud a $20\text{ }^\circ\text{C}$, R_{20} , y la sección transversal S de un conductor sólido se expresa mediante la conocida ecuación:

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}}{S} \quad (2.14)$$

donde ρ_{20} es la resistividad del material del conductor.

Con los cambios de temperatura, el cobre y el aluminio cambian sus dimensiones y resistividad. Esto último puede afectar el diseño térmico de los cables [6, 77]. Para el rango de temperatura práctico entre - 40 y 125 °C, una relación lineal se mantiene aproximadamente entre la resistividad y la temperatura [10]: por lo tanto,

$$R_{dc} = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20)] \quad (2.15)$$

donde α_{20} es el coeficiente de temperatura a 20 °C y θ_c es la temperatura máxima de funcionamiento del conductor (°C). Además, el coeficiente de temperatura varía con el recocido y la pureza. Los valores dados en la Table 2.1 se recomiendan en los cálculos de clasificación del cable.

Tabla 2.1. Resistividad térmica y coeficientes de temperatura [10]

Material	ρ_{20} ($\Omega \cdot \text{m}$)	α_{20} (K^{-1})
Conductor		
Cobre	1.7241×10^{-8}	3.93×10^{-3}
Aluminio	2.8264×10^{-8}	4.03×10^{-3}
Pantallas y armaduras		
Acero	13.8×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Bronce	3.5×10^{-8}	3.0×10^{-3}
Acero inoxidable	70×10^{-8}	Despreciable
Aluminio	2.84×10^{-8}	4.03×10^{-3}
Plomo o aleación de plomo	21.4×10^{-8}	4.0×10^{-3}

b) Resistencia de CA de los conductores: efectos piel y proximidad

La resistencia de un conductor al transportar una corriente alterna es mayor que cuando transporta una corriente continua debido a varios factores. Entre ellos se encuentran el efecto de piel, el efecto de proximidad, la histéresis, las pérdidas por corrientes de Foucault en materiales ferromagnéticos cercanos y las pérdidas inducidas en materiales no ferromagnéticos en cortocircuito cercanos [6, 7, 10, 12, 68]. La complejidad de los cálculos necesarios para justificar económicamente la consideración de estos factores varía ampliamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos, excepto en cables de muy alta tensión con grandes

conductores segmentados, se suele considerar solo el efecto de piel [7].

La resistencia R_{ac} de una corriente alterna que tiene en cuenta los efectos de piel y de proximidad, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R_{ac} = R_{dc} \times k_{sk} \times k_{pt} \approx R_{dc} \cdot (k_{sk} + k_{pr} - 1)$$

En esta ecuación, R_{dc} se define en la ecuación 2.15, y se utiliza la notación de IEC 287 [7], donde $y_s = k_{sk} - 1$ y $y_p = k_{pr} - 1$. Al sustituir los valores correspondientes, se obtiene la siguiente fórmula:

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (2.16)$$

Para cables que se encuentran dentro de tuberías y conductos magnéticos, la ecuación 2.16 cambia a:

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot [1 + 1.5 \cdot (y_s + y_p)] \quad (2.17)$$

En el caso de cables con secciones transversales grandes, es recomendable utilizar conductores segmentados o trenzados para minimizar tanto el efecto de piel como el efecto de proximidad [6].

Es importante destacar que la relación entre R_{ac} y R_{dc} suele ser cercana a la unidad a frecuencia industrial, aunque puede haber un pequeño porcentaje por encima de la unidad en conductores de gran diámetro. La derivación de los factores de efecto de piel y de proximidad es muy compleja y requiere el uso de funciones de Bessel. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta estos factores al calcular la resistencia de un conductor que transporta corriente alterna para garantizar una precisión adecuada en los resultados.

a) Efecto piel y_s : Este efecto se atribuye a la variación del campo magnético, el cual es mayor en el centro del conductor, dando lugar a una reactancia autoinducida mayor y, debido a ello, una densidad de corriente mayor en la periferia que en el núcleo, causando el incremento de la resistencia alterna. El fenómeno del efecto de la piel fue investigado por Maxwell, Heaviside, Rayleigh y Russell. Las siguientes fórmulas aproximadas para el factor de efecto de la piel se deben a Arnold y Goldenber [6, 10].

$$m = \sqrt{\frac{2\pi\mu_r\mu_0 f}{\rho}} \quad (2.18)$$

donde ρ_{el} es la resistividad eléctrica a la temperatura de funcionamiento, μ_r es la perme-

abilidad relativa del conductor ($\mu_r = 1$ para el conductor de cobre y aluminio), μ_0 es la permeabilidad del espacio libre ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$), y f es la frecuencia.

Consideremos un conductor circular con diámetro d_c . Utilizaremos la notación:

$$x^2 = \left(\frac{md_c}{2} \right)^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc} \cdot 10^{-7}} \quad (2.19)$$

Para tener en cuenta el trenzado y el tratamiento de un conductor, se introduce un factor $k_s \leq 1$ en la ecuación 2.19 para obtener

$$x_s^2 = x^2 k_s = \frac{8\pi f}{R_{dc} \cdot 10^{-7}} \cdot k_s \quad (2.20)$$

Los valores experimentales para los coeficientes k_s se dan en la Table 2.2. El factor de efecto piel se obtiene de la siguiente manera:

Para $0 < x_s \leq 2.8$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (2.21)$$

Para $2.8 < x_s \leq 3.8$

$$y_s = -0.136 - 0.0177x_s + 0.0563x_s^2 \quad (2.22)$$

Para $3.8 < x_s$

$$y_s = \frac{x_s}{2\sqrt{2}} - \frac{11}{15} \quad (2.23)$$

En ausencia de fórmulas alternativas, IEC 287 recomienda que se utilice la misma expresión para conductores sectoriales. Dado que para la mayoría de los casos prácticos $x_s \leq 2.8$.

Tabla 2.2. Valores experimentales del efecto de piel y de proximidad [10, 11, 12].

Tipo de conductor	Aislamiento de conductor	k_s	k_p
Cobre			
Redondo, sólido	Todo	1	1
Redondo, trenzado	Fluido / papel / PPL	1	0.8
Redondo, Milliken (segmentario)	Fluido / papel / PPL	0.435	0.37
Redondo, Milliken, alambres aislados	Extruido	0.35	0.20
Aluminio			
Redondo, sólido	Todos	1	
Redondo, varado	Todos	0.8	
Milliken redondo	Todos	0.25	0.15

b) Efecto proximidad y_p : El efecto de Proximidad, es generado por el campo magnético producido por las corrientes alternas que fluyen tanto en los conductores paralelos y cercanos entre sí. Este efecto se visualiza como la densidad de corriente en los lados próximos disminuyen y las de los lados opuestos aumentan debido a la diferencia en las densidades de flujo magnético. Esto da como resultado la resistencia de CA del conductor y se denomina efecto de proximidad. Los efectos de piel y de proximidad rara vez se pueden separar del cable, y los efectos combinados no son directamente acumulativos.

Para que las ecuaciones anteriores sean aplicables a conductores trenzados, se ha utilizado el factor de conductancia transversal empírico k_p . Este coeficiente juega un papel en los cálculos del efecto de proximidad similar al que juega el coeficiente k_s en los cálculos del efecto de la piel. En analogía con la ecuación 2.20, tenemos

$$x_p^2 = x^2 k_p = \frac{8\pi f}{R_{dc}\mu_0} \cdot 10^{-7} \cdot k_p \quad (2.24)$$

en la mayoría de las aplicaciones prácticas, $x_p \leq 2.8$.

Para cables de tres núcleos y para tres cables de un solo núcleo,

$$y_p = F_p \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{F_p + 0.27} \right] \quad \text{con} \quad F_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \quad (2.25)$$

donde s es el espaciado entre los centros de los conductores y

$$F_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \quad (2.26)$$

Las constantes k_s y k_p se dan en la Tabla 2.2. Al igual que con el factor de efecto de piel, las expresiones exactas para el factor de proximidad requieren la solución de las ecuaciones de Bessel. Arnold propuso las aproximaciones para varios rangos de x_p [10].

2.3.4.2 Pérdidas dieléctricas del aislamiento

Cuando se someten aislamientos dieléctricos sólidos a una diferencia de potencial alterna, se comportan como grandes condensadores y fluyen corrientes de carga entre ellos. El esfuerzo necesario para realinear los electrones cada vez que cambia la dirección de la diferencia de potencial (50 o 60 Hz) genera calor y una pérdida de potencia real denominada pérdida dieléctrica, la cual debe diferenciarse de la pérdida reactiva. La magnitud de la corriente de

carga necesaria por unidad de longitud de un cable depende de la constante dieléctrica del aislamiento, las dimensiones del cable y la diferencia de potencial de operación. En algunos casos de fabricación de cables, especialmente en aquellos con aislamiento de papel y alta tensión, esta pérdida puede tener un impacto significativo en la clasificación del cable.

El aislamiento se puede representar mediante una resistencia y un condensador en paralelo, como se muestra en la Figura 2.11. Cuando se aplica una tensión U_0 a este circuito, la corriente I forma un ángulo φ con la tensión. Esta corriente se compone de dos componentes: la corriente capacitiva I_c (de carga) y la corriente resistiva I_r (de fuga). En materiales aislantes de alta calidad, el vector de corriente de fuga es significativamente menor que el de capacitancia, lo que hace que el ángulo de pérdida φ sea muy pequeño.

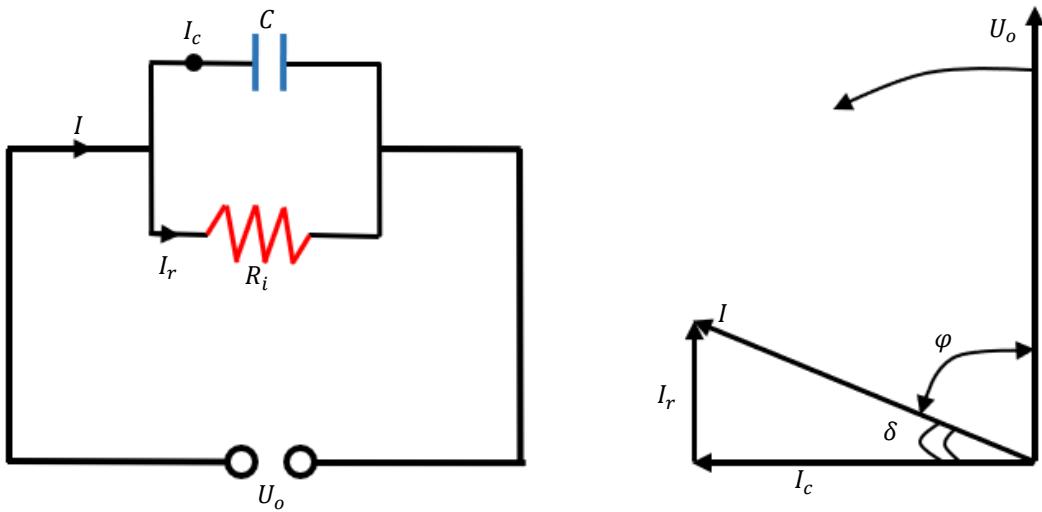


Figura 2.11. Representación del aislamiento de un cable.

Las corrientes de carga y fuga se pueden calcular mediante las ecuaciones:

$$I_c = j\omega CU_0 \quad \text{y} \quad I_r = \frac{U_0}{R_i} \quad (2.27)$$

donde C es la capacitancia del aislamiento, $\omega = 2\pi f$ (siendo f la frecuencia del sistema) y $j = \sqrt{-1}$. En sistemas eléctricos, existe una tensión nominal U_0 entre el conductor y un blindaje metálico. Para determinar la capacidad de un material dieléctrico, se utiliza el concepto de permitividad relativa, representado por ε ($\varepsilon = C/C_0$).

La capacitancia C se puede calcular mediante la ecuación [10, 66, 68]

$$C = \varepsilon C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} \cdot 10^{-9} \quad (2.28)$$

donde C_0 representa la capacitancia de un capacitor del mismo tamaño y construcción que utiliza vacío como dieléctrico. En esta ecuación, D_i es el diámetro externo del aislamiento, excluyendo la pantalla, mientras que d_c es el diámetro del conductor, incluida la pantalla. Además de la capacidad, otra medida importante de un dieléctrico es el factor de disipación, conocido como $\tan \delta$, que se refiere al factor de pérdida del aislamiento. De la [Figura 2.11](#), podemos ver que

$$\tan \delta = \left| \frac{I_r}{I_c} \right| = \frac{U_0}{\omega C R_i U_0} = \frac{1}{\omega C R_i} \quad (2.29)$$

En la práctica, se considera que ε y $\tan \delta$ son constantes para los cálculos de las clasificaciones de los cables, y sus valores se encuentran en la referencia [\[10\]](#).

La pérdida dieléctrica por unidad de longitud se puede obtener a través de [\[66\]](#),

$$W_d = \frac{U_0^2}{R_i} = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (2.30)$$

La pérdida dieléctrica depende del voltaje y, por lo tanto, solo se vuelve importante a niveles de voltaje más altos.

2.3.4.3 Pérdidas en la cubierta y armadura

La resistencia del conductor aumenta debido a las pérdidas en la cubierta y armadura del cable. La cubierta metálica que se aplica sobre el núcleo del cable, ya sea individual o ensamblado, genera pérdidas en la cubierta debido al campo magnético que emana del conductor. De manera similar, la armadura de alambre o lámina de acero también genera pérdidas en la armadura debido al mismo efecto. Este campo inducido consume energía del conductor, reduciendo aún más el valor de la corriente dentro del conductor y aumentando virtualmente su resistencia efectiva [\[68\]](#). Por lo tanto, la resistencia efectiva del conductor se expresa como

$$R_{ef} = R_{ac} \cdot (1 + \lambda_s + \lambda_a) \quad (2.31)$$

donde λ_s y λ_a se denominan factor de pérdida de la cubierta y factor de pérdida del blindaje, respectivamente. Estos valores son necesarios para calcular la capacidad de corriente del cable, aparte de otros factores de pérdida que se definirán más adelante. Todas estas pérdidas se transforman en calor que se disipa en el entorno. Estas pérdidas en forma de calor se

expresan en la forma empírica $I^2 R_{ef}$.

El factor de pérdida λ_s está compuesta por dos componentes: las pérdidas causadas por corrientes circulantes (λ'_1) y las pérdidas causadas por corrientes Foucault (λ''_1) [78]. Esto se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_s = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (2.32)$$

De manera similar, el factor de pérdida en la armadura se compone de dos componentes: las pérdidas causadas por corrientes circulantes (λ'_2) y, para la armadura magnética, las pérdidas causadas por la histéresis (λ''_2). Esto se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_a = \lambda'_2 + \lambda''_2 \quad (2.33)$$

En el caso de los cables de un solo núcleo con cubiertas unidas en ambos extremos, solo se consideran las pérdidas causadas por las corrientes circulantes. Es importante destacar que las pérdidas de corriente circulante son mucho mayores que las pérdidas de corrientes Foucault, y dominan completamente los cálculos. Sin embargo, en situaciones en las que las cubiertas están aisladas o unidas solo en un punto, no hay corrientes circulantes.

2.3.4.4 Pérdidas de corriente circulante

Los factores de pérdida de la cubierta y la armadura debido a las corrientes circulantes se definen como:

$$\lambda_s = \frac{\text{Pérdida de potencia debido a la pantalla}}{\text{Pérdida de potencia en el conductor}} = \frac{W_s}{W_c} = \frac{R_s I_s^2}{R_{ac} I_c^2} \quad (2.34)$$

$$\lambda_a = \frac{\text{Pérdida de potencia debido a la armadura}}{\text{Pérdida de potencia en el conductor}} = \frac{W_s}{W_c} = \frac{R_s I_s^2}{R_{ac} I_c^2} \quad (2.35)$$

donde R_s y R_a representan la resistencia de CA de la cubierta y de la armadura a su temperatura de operación, respectivamente. Las corrientes que fluyen en la cubierta y en la armadura se denotan como I_s e I_a , respectivamente.

a) Cables de un solo conductor: El valor de λ''_1 es igual a cero, excepto para aquellos cables que tienen conductores de construcción segmentaria de gran tamaño. Para estos casos, se debe calcular λ''_1 siguiendo las indicaciones de la referencia [10, 68].

En relación a la cubierta de un cable, la reactancia X se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) \quad (2.36)$$

donde:

s = distancia entre los ejes de los conductores (mm).

d = diámetro medio de la vaina (mm). Para las cubiertas corrugadas, el diámetro medio de la vaina corrugada sólida equivalente se calcula como $\frac{1}{2}(D_{oc} + D_{it})$. D_{oc} representa el diámetro de un cilindro coaxial imaginario que toca exactamente las crestas de la vaina corrugada (mm), y D_{it} es el diámetro de un cilindro imaginario que toca exactamente la superficie interior de los valles de la vaina corrugada (mm).

Es importante tener en cuenta que, en este caso, se desestima la pérdida por corrientes Foucault ($\lambda''_1 = 0$), a menos que los cables tengan conductores Milliken [10, 12]. En este último caso, se debe utilizar el método indicado en [10] para calcular λ''_1 . Mediante un procedimiento complejo descrito en la referencia [10], el factor de pérdida de la vaina se reduce a:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R_{ac}} \cdot \frac{X^2}{R_s^2 + X^2} = \frac{R_s}{R_{ac}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (2.37)$$

b) Cables de un solo conductor en una formación plana, con transposición regular y cubiertas unidas en ambos extremos: Arnold desarrolló ecuaciones para calcular con precisión las pérdidas en el revestimiento de cables dispuestos en una configuración plana, donde el cable central se encuentra equidistante de los dos cables externos. En este contexto, la reactancia mutua entre la cubierta de un cable y los conductores de los otros dos se expresa de manera rigurosa como sigue:

$$X_m = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln(2) \text{ } (\Omega/\text{m})$$

Por conveniencia, se define el término X_1 como una función que depende tanto de la reactancia X como de la reactancia mutua X_m :

$$X_1 = X + \frac{X_m}{3} = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln \left[2\sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d} \right) \right] \quad (2.38)$$

c) Tres cables de un solo núcleo sin transposición, cubiertos y adheridos en ambos extremos, se colocan en formación plana con el cable del medio equidistante de los dos externos: La inductancia mutua entre el cable del medio y cada uno de los cables externos está dada por dos veces el valor dado por la ecuación (2.36). Sin embargo, debido a que el espaciado axial entre los dos cables externos es $2s$, la reactancia mutua entre ellos viene dada por la formación con el cable del medio equidistante de los dos externos. La inductancia mutua entre el cable del medio y cada uno de los cables externos está dada por el doble de lo dado por:

$$P = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln 2 + 2\omega \cdot 10^{-7} \ln 2 \cdot \frac{2s}{d} = X_m + X \quad (2.39)$$

Las expresiones siguientes para el factor de pérdida de la vaina se discuten en detalle en [10, 68], aquí mencionaremos únicamente la solución final:

En la fase principal:

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R_{ac}} \left[\frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} - \frac{2R_s PQ X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + Q^2)(R_s^2 + P^2)} \right]$$

En el cable del medio:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R_{ac}} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad (2.40)$$

En el cable de retraso:

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R_{ac}} \left[\frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{2R_s PQ X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + Q^2)(R_s^2 + P^2)} \right]$$

donde Q esta definidos por:

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

El factor de pérdida total de la vaina de los tres cables combinados.

$$\lambda'_1 = \frac{1}{2} \frac{R_s}{R_{ac}} \left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{P^2}{R_s^2 + P^2} \right) \quad (2.41)$$

Para calcular I , primero se debe determinar λ'_1 de cada cable individualmente. Es recomendable tomar el valor más alto de λ'_1 , calculado a partir de los tres cables.

2.3.4.5 Pérdidas por corrientes de Foucault en la cubierta

La corriente de Foucault de primer orden en la cubierta es causada por la interacción entre su propia corriente de conductor axial y las corrientes de los cables vecinos. Estas corrientes de Foucault se pueden considerar por separado y luego sumar las pérdidas resultantes [79]. En la mayoría de los casos prácticos, las pérdidas autoinducidas son insignificantes.

En el caso de conductores segmentarios de gran tamaño, es importante considerar tanto las pérdidas por corriente de Foucault en la cubierta como las pérdidas por corriente circulante cuando se busca minimizar el efecto de proximidad. Si las cubiertas de los cables están conectadas en un solo punto, las pérdidas por corriente de Foucault se deben exclusivamente a los efectos electromagnéticos de las corrientes en el conductor principal. Sin embargo, en sistemas con conexiones sólidas, las pérdidas por corriente de Foucault en la cubierta dependen tanto de las corrientes en el conductor principal como de las corrientes circulantes en la cubierta.

Calcular con precisión las pérdidas por corriente de Foucault en estas condiciones resulta extremadamente complejo e innecesario, ya que su impacto en la clasificación de corriente de los cables unipolares sólidamente unidos es mínimo. Para abordar esta situación, Miller desarrolló en 1929 una aproximación adecuada que tiene en cuenta cómo las corrientes circulantes afectan las pérdidas por corrientes parásitas. Esta aproximación se utiliza en la norma IEC 287, donde las pérdidas por corriente de Foucault se calculan asumiendo únicamente las corrientes en el conductor principal y luego se multiplican por un factor F según la fórmula establecida [69].

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)} \quad (2.42)$$

para cables en formación plana con espaciamiento equidistante,

$$M = \frac{R_s}{X + X_m} \quad \text{y} \quad N = \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}},$$

El cálculo del factor de pérdida en tres cables de un solo núcleo en formaciones planas se simplifica utilizando expresiones específicas. Estas simplificaciones son especialmente útiles para abordar la complejidad del cálculo, y se describen en detalle en [10]. En primer lugar, se utiliza el primer término de las ecuaciones (8.101), (8.103), (8.105) como una aproximación

de los efectos de Foucault de primer orden. Esta aproximación permite tener en cuenta los principales efectos de Foucault en el cálculo del factor de pérdida. En segundo lugar, se emplea una expresión analítica para aproximar los términos restantes de la ecuación (8.112). Esta expresión permite simplificar el cálculo de los componentes restantes del factor de pérdida. Cabe destacar que las demostraciones rigurosas de estas aproximaciones se detallan en [79], proporcionando una base sólida para su utilización en el cálculo del factor de pérdida en cables de un solo núcleo en formaciones planas. Las expresiones simplificadas resultantes son:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R_{ac}} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{-12}} \right] \quad (2.43)$$

donde g_s es el factor de corrección desarrollado e incorporado por [79] y viene dado por la siguiente ecuación:

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s \times 10^{-3} - 1.6) \quad (2.44)$$

donde t_s es el espesor de la cubierta (mm), D_s es el diámetro externo de la vaina del cable (mm), $\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7\rho_s}}$, y ρ_s es la resistividad eléctrica del material de la funda (Ω/m) definida como $\rho_s = \rho_{20}[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20)]$.

Las fórmulas para λ_0 (primer término de la pérdida por corrientes de Foucault de primer orden), Δ_1 y Δ_2 de la ecuación (2.43) se presentan a continuación [69]:

Tres cables unipolares en formación plana:

Cable central:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 6 \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \frac{m^2}{1 + m^2} \\ \Delta_1 &= 0.86m^{3.08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{1.4m+0.7} \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\Delta_2 = 0$$

Fase principal del cable exterior:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1.5 \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \frac{m^2}{1 + m^2} \\ \Delta_1 &= 4.7m^{0.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{0.16m+2} \\ \Delta_2 &= 21m^{3.3}(d/2s)^{1.47m+5.06} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Fase de retraso del cable exterior:

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= 1.5 \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \\ \Delta_1 &= \frac{0.74(m+2)m^{0.5}}{2+(m-0.3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{m+1} \\ \Delta_2 &= 0.92m^{3.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{m+2}\end{aligned}\quad (2.47)$$

donde m está definido por

$$m = \frac{\mu\mu_0\omega}{4\pi R_s}$$

y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, H/m (permeabilidad en el vacío).

En muchos casos prácticos, solo serán de interés las corrientes de Foucault de primer orden. Para la mayoría de los cables de alimentación, los valores de m se encuentran típicamente en el rango de 0.3-0.7 con factores de espaciado menores que 0.2, y aquí se permite el uso de la solución de primer orden [10]. Además, para cables con revestimiento de plomo, g_s se puede tomar como unidad y se puede despreciar el término $(\beta_1 t_s)^4 / 12 \times 10^{-12}$. En el caso de cables con revestimiento de aluminio, es posible que sea necesario evaluar ambos términos cuando el diámetro del revestimiento sea superior a aproximadamente 70 mm o el revestimiento sea más grueso de lo habitual.

2.3.5 Comportamiento térmico del cable

La potencia transmitida por un cable está limitada por la temperatura máxima de operación del cable, típicamente 90 °C para cables modernos [1, 6]. En consecuencia, las condiciones de disposición y la ruta de instalación elegida para el cable son de suma importancia y tienen una influencia directa en la ampacidad del cable.

Las capas no conductoras que separan al conductor del entorno presentan resistencias térmicas que limitan el flujo de calor y se dividen en resistencias térmicas internas y externas. Por otro lado, las partes metálicas de un cable, es decir, las capas conductoras, son buenos conductores de calor y se consideran isotermiales.

Las resistencias térmicas internas (en K·m/W) por unidad de longitud se clasifican comúnmente en tres tipos: la resistencia térmica de la capa de aislamiento (T_1), la resistencia térmica entre la cubierta (vaina) y la armadura (T_2) y la resistencia térmica para la cubierta

exterior del cable (T_3). La resistencia térmica externa (T_4) está formada por el suelo que rodea al cable, y es crucial ya que puede ser responsable de diferencias significativas en la ampacidad del cable.

Es importante destacar que esta tesis se enfoca en el estudio de cables de un solo núcleo, que es la configuración más común en altas tensiones. Sin embargo, existen otras configuraciones posibles y comunes en los niveles de distribución que no se abordan en este capítulo, como los cables entubados, instalados en conductos o túneles. Para aquellos interesados en estos casos, se recomienda consultar la norma [10, 69].

2.3.5.1 Resistencias Térmicas Internas

Para todas las partes cilíndricas de un cable de un solo conductor, la resistencia térmica del aislamiento se calcula según la ecuación:

$$T_1 = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{D_c} \right) \quad (2.48)$$

donde ρ_t es la resistividad térmica del aislamiento ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$), t_1 es el espesor del aislamiento (mm) y D_c es el diámetro del conductor (mm) [6]. Para las cubiertas corrugadas, t_1 se basa en el diámetro interno medio de la cubierta, que es igual a $[(D_{oc} + D_{it})/2]$.

La resistencia térmica entre la cubierta y la armadura se obtiene a partir de la ecuación (2.7), que representa la resistencia térmica de cualquier capa concéntrica. Con la notación aplicable a esta parte del cable, tenemos:

$$T_2 = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_s} \right) \quad (2.49)$$

donde ρ_t es la resistencia térmica del relleno, t_2 es el grosor del relleno (mm) y D_s es el diámetro externo de la cubierta metálica (mm).

Los revestimientos externos suelen estar en forma de capas concéntricas, y la resistencia térmica T_3 se da por:

$$T_3 = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D_a} \right) \quad (2.50)$$

la variable t_3 se refiere al espesor de la capa exterior (mm), mientras que D_a se refiere al diámetro externo de la armadura.

Para las cubiertas corrugadas [69],

$$T_3 = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{D_{oc} + 2t_3}{d + t_s} \right) \quad (2.51)$$

donde D_{oc} representa el diámetro del cilindro coaxial que toca exactamente las crestas de la cubierta corrugada (mm), y d es el diámetro medio equivalente de la cubierta corrugada mencionado en la ecuación (2.36). Además, t_s se refiere al espesor de la cubierta (mm).

2.3.5.2 Resistencias Térmicas externas

La ampacidad de un cable está estrechamente relacionada con la resistencia térmica del entorno que lo rodea. La resistividad térmica, por su parte, es influenciada por varios factores, como la composición y textura del suelo, el contenido de agua, la densidad, el diámetro del cable, la profundidad de instalación, el método de colocación y el campo térmico generado por los cables cercanos, entre otros [59]. Dada la complejidad de esta interacción, no existe una fórmula sencilla para calcular la resistencia térmica externa, sino que se requiere una prueba específica para cada tipo de suelo con el fin de determinar su resistividad.

Es importante tener en cuenta que, una vez que se instala un cable, la humedad del suelo es el único factor que experimenta un cambio significativo con el tiempo. En este sentido, la resistencia térmica externa es el principal responsable del aumento de temperatura en el conductor, representando más del 70 % de dicho aumento [7, 80]. Cabe destacar que en el caso de los cables aéreos, su efecto es menos significativo.

a) Resistencia térmica de un solo cable enterrado En el caso de cables directamente enterrados en un suelo uniforme con una profundidad de enterramiento significativamente mayor que el diámetro del cable, se puede emplear una versión simplificada de la fórmula de Kennelly para calcular la resistencia térmica del suelo [10].

$$\Delta\theta = \frac{\rho_s}{2\pi W_t} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (2.52)$$

donde

$$u = 2L/D_e$$

ρ_s es la resistividad térmica del suelo (K·m/W)

L es la profundidad de enterramiento del centro del cable (mm)

D_e es el diámetro externo del cable (mm)

W_t es la pérdidas totales dentro del cable (W/m)

La resistencia térmica externa puede calcularse a partir de las ecuaciones (2.52) y (2.9) como sigue:

$$T_{4\mu} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (2.53)$$

Cuando la profundidad de enterramiento es mucho mayor que el diámetro del cable, el valor de u es mucho mayor que uno, lo que hace que la ecuación (2.53) se simplifique a:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_e} \quad (2.54)$$

El error asociado al uso de la ecuación (2.53) en lugar de la ecuación (2.54) depende del valor de u , y puede llegar a ser tan alto como el 15 % para $u = 1.5$. Sin embargo, en la práctica, u rara vez es menor que 10, por lo que se puede utilizar la versión simplificada de la fórmula de Kennelly, es decir, la ecuación 2.54.

b) Resistencia térmica de grupos de cables (sin tocar) Para calcular la resistencia térmica de varios cables cargados colocados bajo tierra, es necesario tener en cuenta los campos de calor superpuestos. En este caso, el principio de superposición se aplica asumiendo que cada cable actúa como una fuente de línea y no distorsiona el campo de calor de los otros cables. Por lo tanto, se asume que los cables están lo suficientemente espaciados como para que esta suposición sea aproximadamente válida, y que la separación axial de los cables debe ser de al menos dos diámetros de cable [10].

- **Cables con carga desigual:** Para abordar la carga desigual en grupos de cables, es necesario contar con un método específico que permita calcular las clasificaciones de los cables separados. En este sentido, se sugiere primero calcular el aumento de temperatura en la superficie del cable en cuestión, que es causado por la carga de los otros cables del grupo. Posteriormente, se resta este aumento del valor de $\Delta\theta$ correspondiente a la corriente. Para realizar este cálculo, es posible utilizar la fórmula que se describe en [10], la cual permite calcular el aumento de temperatura $\Delta\theta_{kp}$ en la superficie del cable p , debido a la potencia W_k disipada en el cable k por unidad de longitud.
- **Cables con carga igual:** En el caso de un grupo de cables idénticos con carga

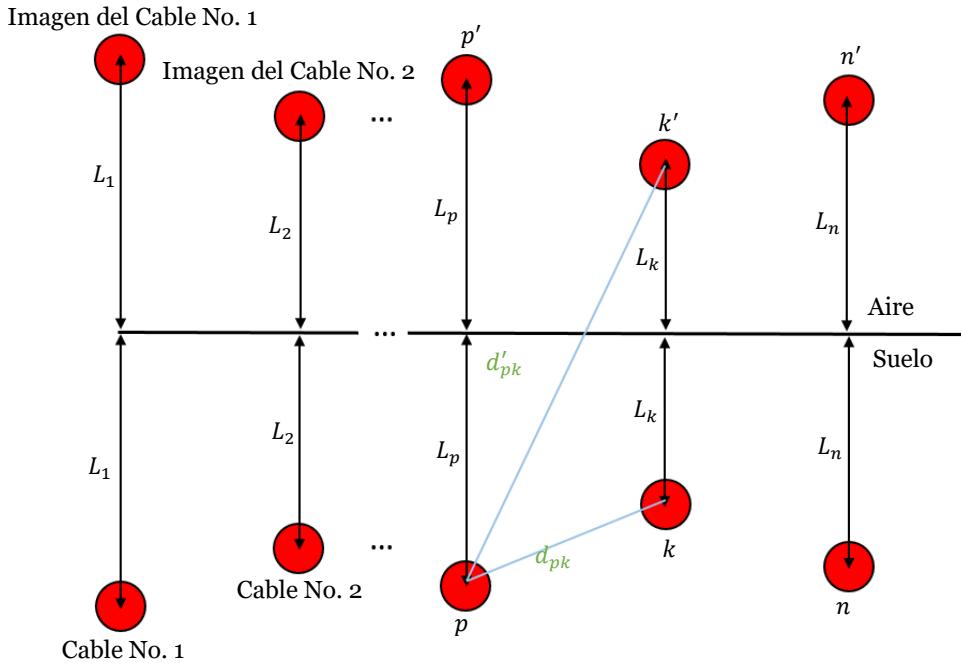


Figura 2.12. Ilustración de la resistencia térmica externa de un solo cable enterrado bajo un plano isotérmico.

igual, los cálculos pueden simplificarse significativamente. La clasificación del grupo se determina por la ampacidad del cable más caliente. En general, se puede identificar cuál cable será el más caliente a partir de la configuración de la instalación, y calcular la clasificación para ese cable. Sin embargo, en situaciones más complejas, puede ser necesario realizar cálculos adicionales para otro cable. El método consiste en calcular un valor modificado de T_3 que tiene en cuenta el calentamiento mutuo del grupo. Si las pérdidas en el grupo de cables son iguales, la ecuación se simplifica a:

$$T_{4\mu} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left\{ (u + \sqrt{u^2 - 1}) \cdot \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pn}}{d_{pn}} \right) \right] \right\} \quad (2.55)$$

en donde d_{pk} y p'_{pk} son las distancias medidas desde el centro del p -ésimo cable hasta el centro del cable k y el centro de reflexión del cable k en la superficie tierra-aire, respectivamente (ver Figura 2.12). Además, hay $(n - 1)$ factores entre corchetes, excluyendo el término d'_{pp}/d_{pp} .

c) Resistencia de cables enterrados en relleno térmico

En la instalación de cables subterráneos, es común utilizar rellenos térmicos para mejorar las condiciones térmicas de los mismos. Estos rellenos buscan modificar la resistencia del

cable, siendo la resistencia térmica del suelo el parámetro más variable y la mayor resistencia a la disipación de calor en cables subterráneos[7, 10, 80, 81]. El uso de rellenos térmicos ha evolucionado a lo largo del tiempo, desde la utilización de arenas naturales hasta la creación de arenas térmicas fabricadas y evaluaciones de piedra caliza [73]. A medida que avanzaban las investigaciones, se identificaron problemas en los materiales utilizados y se buscaba mejorar las propiedades térmicas en un amplio rango de contenidos de humedad, así como simplificar las técnicas de instalación. En este contexto, se desarrolló un relleno térmico fluidizado que contiene arena, agregado, cemento y cenizas volantes, el cual ofrece propiedades térmicas muy efectivas [1, 21, 82].

Los rellenos térmicos fluidizados, que consisten en arena fina y GruntarTM de Lafarge Polonia, son actualmente los materiales de relleno térmico más utilizados. GruntarTM es una mezcla de ingeniería que contiene principalmente cemento Portland, así como otros aditivos minerales como ceniza volante, yeso y polvo de piedra caliza. Su uso es crucial para asegurar que los cables permanezcan dentro de las temperaturas permitidas en todas las condiciones de carga y para aumentar su ampacidad [40]. Además, es el material más comúnmente utilizado para mejorar la disipación de calor en los cables de alta y extra alta tensión.

En [71], Neher y McGrath en, presentaron el primer intento de modelar la presencia de un banco de conductos o un relleno térmico y posteriormente se adoptó en la Norma IEC 287 [69]. En trabajos posteriores de El-Kady y otros [83, 84], el método básico de Neher y McGrath se amplió para tomar tener en cuenta los rellenos y los bancos de conductos de formas rectangulares alargadas, y eliminar el supuesto de que el perímetro externo del rectángulo es isotérmico.

El enfoque de Neher– McGrath: Cuando el sistema de cables está contenido dentro de una envoltura con una resistividad térmica ρ_r , el efecto de la resistividad térmica del relleno del envoltorio que es diferente a la del suelo circundante ρ_s se maneja asumiendo inicialmente que la resistividad térmica del medio es ρ_r en su totalidad. En este sentido, la resistencia térmica externa del cable central, que suele ser el más caliente, se puede determinar mediante la ecuación (2.55).

$$T_{4r} = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln \left[\left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \cdot F \right] \quad (2.56)$$

la variable F representa el factor que considera el efecto de calentamiento mutuo en un

sistema de cables idénticos cargados de manera equitativa. La expresión para calcular este factor se encuentra entre corchetes en la última parte de la ecuación (2.55).

Después de calcular la resistencia térmica T_{4r} , se realiza una corrección algebraica para tener en cuenta la diferencia en las resistividades térmicas entre el envoltorio y el suelo circundante [71, 83, 85]. Esta corrección a la resistencia térmica se expresa como:

$$T_4^{\text{corr}} = \frac{N}{2\pi}(\rho_s - \rho_r) \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) = \frac{N}{2\pi}(\rho_s - \rho_r)G_b \quad (2.57)$$

donde

N es el número de cables cargados en la envolvente,

$$u = \frac{L_G}{r_b},$$

L_G es la profundidad de tendido al centro del banco de conductos o relleno en mm,

r_b es el radio equivalente de la envolvente en mm.

G_b es el factor geométrico.

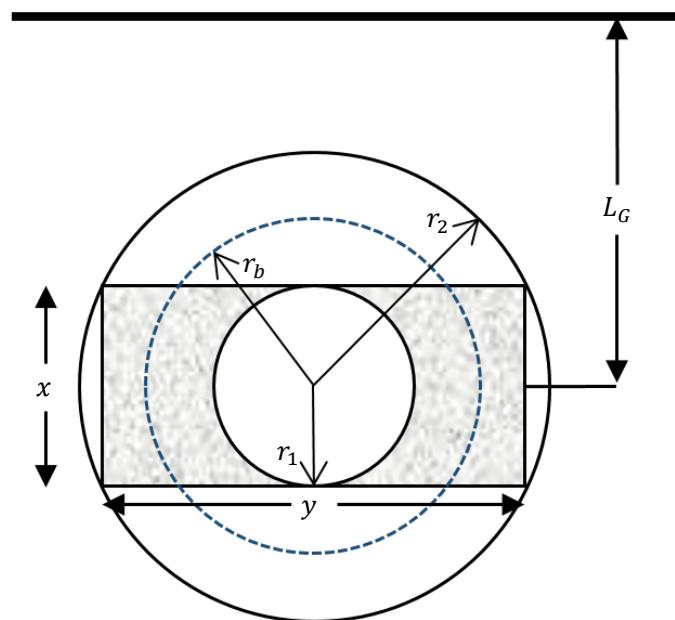


Figura 2.13. Representación de un relleno por una envoltura circular.

Por lo tanto, la resistencia térmica externa se expresa como:

$$T_4 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln \left[\left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \cdot F \right] + \frac{N}{2\pi}(\rho_s - \rho_r)G_b \quad (2.58)$$

El radio equivalente de la envolvente térmica se obtiene de la siguiente manera (ver Figura 2.13), considerando que la superficie del banco de conductos es un círculo isotérmico

de radio r_b , la resistencia térmica entre el banco de conductos y la superficie de la tierra será una función logarítmica de L_G y r_b . Para evaluar r_b en términos de las dimensiones x e y ($x \leq y$) de una envolvente térmica rectangular, considere dos círculos: uno inscrito y fuera de la envolvente. El radio del círculo inscrito en la envoltura es

$$r_1 = \frac{x}{2}$$

y el radio de un círculo más grande que toca las cuatro esquinas es

$$r_2 = \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \left(\frac{y}{2}\right)^2}.$$

Supongamos que el círculo de radio r_b se encuentra entre estos círculos, y que la magnitud de r_b es tal que divide la resistencia térmica entre r_1 y r_2 . Por lo tanto,

$$\ln \frac{r_b}{r_1} = \frac{xy - \pi r_1^2}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

a partir del cual,

$$r_b = \exp \left[\frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \right) \right] \quad (2.59)$$

La ecuación (2.58) solo es válida para razones de y/x menores que 3 [83].

2.3.6 Ampacidad del cable en condiciones de estado estacionario

La ampacidad de un sistema de cables depende de factores como la cantidad, construcción y materiales de los cables, su ubicación y disposición, y el entorno en el que están instalados. Para determinarla, se utilizan ecuaciones de clasificación de estado estacionario y transitorio, basadas en la representación de la red de parámetros agrupados del sistema de cable. Estas ecuaciones se desarrollan para un solo cable, pero se pueden aplicar a instalaciones de múltiples cables seleccionando adecuadamente la resistencia térmica externa [10]. En esta tesis, se enfoca en las condiciones de estado estacionario, resultado de carga constante o cíclica.

2.3.6.1 Cables enterrados sin migración de humedad

Los cálculos de estado estable implican resolver la ecuación para la red de escalera, sin tener en cuenta las capacitancias térmicas [7]. La cantidad desconocida es la corriente del

conductor I o su temperatura de funcionamiento θ_c . En el primer caso, se da la temperatura máxima de funcionamiento del conductor, y en el segundo caso, se especifica la corriente del conductor.

Debido a que las pérdidas de calor ocurren en múltiples posiciones a lo largo del sistema de cable, se produce una transferencia de calor que se absorbe y libera hasta que se alcanza un equilibrio térmico. Esta transferencia de calor puede representarse mediante una serie de resistencias análogas a la ley de Ohm, como se muestra en la Figura 2.14 [68]. La pérdida total en julios, representada como W_I , en un cable puede ser expresada tomando en consideración las ecuaciones (2.34) y (2.35) de la siguiente manera:

$$W_I = W_c + W_s + W_a = W_c(1 + \lambda_s + \lambda_a) \quad (2.60)$$

donde W_c , W_s y W_a (W/m) representan pérdidas de conductor, de la cubierta y de la armadura, respectivamente. La cantidad λ_s se denomina factor de pérdida de la cubierta y es igual a la relación entre las pérdidas totales en la cubierta metálica y las pérdidas totales del conductor. De manera similar, λ_a se llama factor de pérdida de armadura y es igual a la relación entre las pérdidas totales en la armadura metálica y las pérdidas totales del conductor.

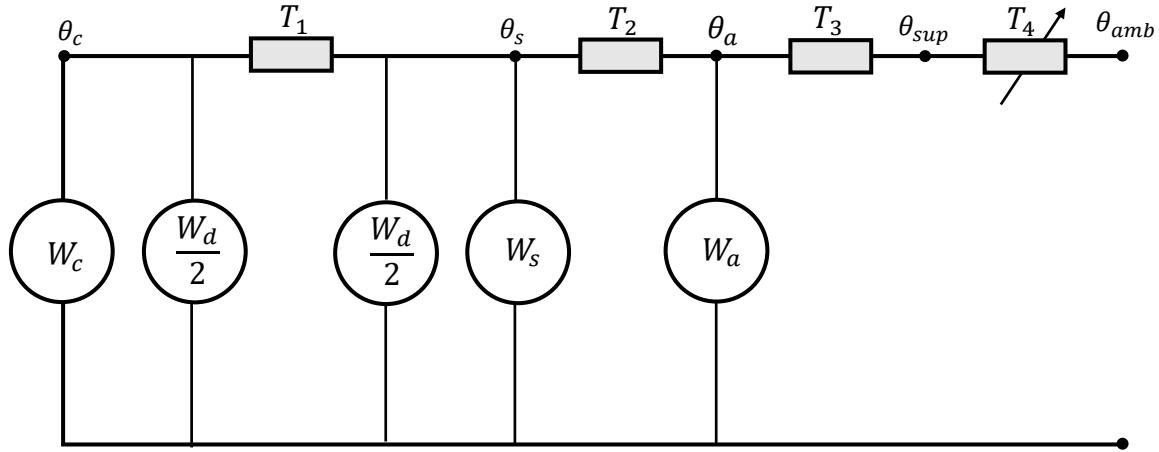


Figura 2.14. Circuito Térmico Equivalente para un Cable Mononúcleo Enterrado.

Refiriéndonos ahora al diagrama de la Figura Figura 2.14 y recordando la analogía entre los circuitos eléctrico y térmico, podemos escribir la siguiente expresión para $\Delta\theta$, el aumento de temperatura del conductor por encima de la temperatura ambiente:

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{W_d}{2} \right) T_1 + [W_c(1 + \lambda_s) + W_d] nT_2 + [W_c(1 + \lambda_s + \lambda_a) + W_d] n(T_3 + T_4) \quad (2.61)$$

donde n indica el número de conductores en el cable y W_d representa las pérdidas dieléctricas. La temperatura ambiente es la temperatura del medio circundante en condiciones normales.

La ampacidad del cable se obtiene de la ecuación (2.61) [86]. Recordando que $W_c = I^2 R_{ac}$, tenemos

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R_{ac}T_1 + nR_{ac}(1 + \lambda_s)T_2 + nR_{ac}(1 + \lambda_s + \lambda_a)(T_3 + T_4)}} \quad (2.62)$$

donde R_{ac} es la resistencia de CA por unidad de longitud del conductor a la temperatura máxima de funcionamiento. La ecuación (2.62) a menudo se escribe en una forma más simple que distingue claramente entre las transferencias de calor internas y externas en el cable. Denotando

$$\begin{aligned} T &= \frac{T_1}{n} + (1 + \lambda_s)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_a)T_3 \\ T_d &= \frac{T_1}{2n} + T_2 + T_3 \end{aligned} \quad (2.63)$$

La ecuación (2.62) se convierte en

$$\Delta\theta = n(W_c T + W_t T_4 + W_d T_d) \quad (2.64)$$

donde W_t son las pérdidas totales generadas en el cable definido por:

$$W_t = W_I + W_d = W_c(1 + \lambda_s + \lambda_a) + W_d \quad (2.65)$$

y T calculado a partir de la ecuación (2.63) es una resistencia térmica de cable equivalente. Esta es una resistencia térmica interna del cable, que depende solo de la fabricación del cable. La resistencia térmica externa, por otro lado, dependerá de las propiedades del medio circundante, así como del diámetro total del cable, como se muestra a continuación. El último término en la ecuación (2.64) es el aumento de temperatura causado por las pérdidas dieléctricas. Denotándolo por $\Delta\theta_d$,

$$\Delta\theta_d = nW_d T_d \quad (2.66)$$

2.4 Cálculo de vida electro-térmica del aislamiento

El envejecimiento de los cables se debe principalmente a dos factores: la influencia del entorno circundante y los defectos de fabricación [87]. El entorno circundante, como la temperatura externa, la radiación y la humedad, junto con los defectos de fabricación del cable, como huecos, contaminación y defectos mecánicos, pueden contribuir al deterioro del aislamiento con el tiempo. Aunque muchos investigadores han abordado el envejecimiento de los cables, la evaluación de los efectos combinados en el proceso de envejecimiento representa un desafío.

En el caso de los cables subterráneos, la corriente de carga y la temperatura ambiente del suelo generan calor en el interior del cable, lo que provoca un aumento en la temperatura del conductor. En general, los cables operan dentro de los límites adecuados de ampacidad, a excepción de situaciones de emergencia que requieren una sobrecarga. Debido a la inercia térmica del cable y la temperatura ambiente, la temperatura máxima en la interfaz conductor-aislamiento se mantiene por debajo de la temperatura máxima nominal [88].

Sin embargo, estudios experimentales han demostrado que la combinación de estrés eléctrico y estrés térmico puede reducir significativamente la vida útil de los materiales aislantes [13]. Para comprender el envejecimiento de los cables XLPE, se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas y se han propuesto diversos modelos para estimar su vida útil [13, 15, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 94]. Estos modelos tienen en cuenta factores como el campo eléctrico y la temperatura del conductor, y algunos de ellos combinan los efectos de las tensiones eléctricas y térmicas para proporcionar una estimación más precisa de la vida útil del cable.

Por lo tanto, en esta sección, se lleva a cabo una evaluación de la pérdida de vida útil del aislamiento teniendo en cuenta los esfuerzos combinados de estrés térmico y eléctrico.

2.4.1 Envejecimiento Térmico

El modelo de Arrhenius ha sido ampliamente empleado en pruebas de envejecimiento acelerado para evaluar el grado de envejecimiento de cables de alimentación aislados con polietileno reticulado (XLPE). Aunque su uso principal es predecir el envejecimiento en pruebas aceleradas, este modelo también puede aplicarse para evaluar el envejecimiento natural del cable [14, 16, 95, 96].

El XLPE, un polímero termoestable ampliamente utilizado en cables de alimentación

modernos, presenta propiedades excepcionales que lo hacen ideal para aplicaciones eléctricas. En la literatura, se han reportado diversos modelos de vida que han sido ampliamente utilizados para estimar la duración de vida de los cables de XLPE. Estos modelos, detallados en la [Tabla 2.3](#), proporcionan una base sólida para evaluar la vida útil y la confiabilidad de estos cables en diferentes condiciones y entornos.

Los materiales aislantes se pueden dividir en dos grupos según su umbral de temperatura. Los materiales de umbral son aquellos que presentan un valor de estrés térmico o eléctrico por debajo del cual el envejecimiento es insignificante, mientras que los materiales sin umbral también presentan un valor de umbral, pero es demasiado pequeño para ser significativo [13, 14]. Para los materiales de umbral, se utilizan el modelo antiguo de Arrhenius Thresh (ATM) y el modelo de umbral de Arrhenius de 4 parámetros (4pATM), mientras que para los materiales sin umbral se utilizan el modelo de Arrhenius (AM) y el modelo de Eyring (EM).

Tabla 2.3. Modelos de vida para el estrés térmico y eléctrico [13, 14, 15, 16].

Especificación	Modelo de vida	Fórmula
Estrés térmico		
Material sin umbral	AM	$L = L_0 e^{-BC\theta}$
Material con umbral	ATM	$L = \frac{L_0 e^{-BC\theta}}{\left(\frac{\theta_c}{\theta_{t0}} - 1\right)}$
Material sin umbral	EM	$L = \frac{c}{\theta_c} e^{\frac{D}{\theta_c}}$
Material con umbral	4pATM	$L = \frac{L_0 e^{-BC\theta}}{\left(\frac{\theta_c}{\theta_{t0}} - 1\right)^\mu}$
Estrés eléctrico		
Material sin umbral	IPM	$L = t_h \left(\frac{E}{E_h}\right)^{-n}$
Material con umbral	IPTM	$L = t_h \left(\frac{E - E_{t0}}{E_h - E_{t0}}\right)^{-n}$
Material sin umbral	EM	$L = L_0 e^{-h'E}$
Material con umbral	4pETM	$L = \frac{L_0 e^{-h'E}}{\left(\frac{E}{E_{t0}} - 1\right)^\mu}$

En este documento, se ha seleccionado el modelo de umbral de Arrhenius (ATM) para modelar el envejecimiento del aislamiento XLPE. El modelo de umbral, como el ATM, se utiliza para capturar el comportamiento no lineal de ciertos materiales en respuesta al estrés. Estos materiales muestran un envejecimiento acelerado solo cuando se supera un nivel crítico de estrés, en lugar de una respuesta uniforme en todo el rango de estrés. Al incorporar un umbral en el modelo, se puede describir con mayor precisión cómo el envejecimiento del material se acelera a medida que el estrés supera dicho umbral. Esto es especialmente

importante cuando se observa una mayor degradación o fallo del material a niveles de estrés más altos. El uso del modelo de umbral ATM permite una predicción más precisa del comportamiento de vida útil del material en condiciones reales, al tener en cuenta su respuesta no lineal a diferentes niveles de estrés. Al ajustar los parámetros del modelo y establecer el umbral adecuado, se puede obtener una representación más precisa del envejecimiento del material en situaciones específicas donde el estrés desempeña un papel crítico. Este modelo se expresa mediante la ecuación:

$$L_\theta = \frac{L_0 e^{-BC_\theta}}{\frac{\theta_c}{\theta_{t0}} - 1} \quad (2.67)$$

donde:

- L_θ es la vida térmica (es decir, el tiempo hasta la falla cuando la temperatura es el único estrés activo)
- θ_{t0} es una temperatura de referencia normalmente ajustada a la temperatura máxima del conductor (es el tiempo correspondiente a la falla).
- L_0 es la vida útil del cable establecida comúnmente a una temperatura ambiente.
- $B = \frac{\Delta w}{\kappa}$, donde Δw es la energía de activación del grado térmico principal de reducción de radiación y κ es la constante de Boltzmann.
- $C_\theta = \frac{1}{\theta_c} - \frac{1}{\theta_0}$ se define como el estrés térmico convencional, donde θ_c es la temperatura del conductor que depende de la ampacidad del cable y es una función de la carga del cable, la resistividad del suelo nativo/de relleno, la temperatura ambiente y las condiciones de instalación que conforman el circuito térmico del cable.

Tabla 2.4. Parámetros constantes de envejecimiento del XLPE.

Parámetros	Valor
Vida útil del cable L_0	40 años
Temperatura de referencia θ_{t0}	363 K
Constante de Boltzmann B	12430 K

En el contexto del estudio de los cables de XLPE, se han identificado ciertos parámetros de vida que se mantienen constantes para la muestra considerada [16, 94], los cuales se encuentran detallados en la [Table 2.4](#). Se ha observado que, si la temperatura del conductor

excede el límite máximo permitido (90°C o 363 K), la vida útil del cable disminuye de manera exponencial. Por otro lado, cuando la temperatura del conductor se mantiene por debajo del límite máximo permitido, la vida útil del cable no se ve afectada de forma significativa.

En la práctica, se ha determinado que la vida útil máxima de un cable se sitúa generalmente en un rango de 40 a 55 años, aunque en algunos casos la diferencia entre la vida útil teórica y la esperanza de vida puede superar los 40 años. Con el objetivo de asegurar que nuestro modelo sea realista y coherente con la realidad, estableceremos un límite máximo de esperanza de vida de 55 años y utilizaremos un factor de penalización en nuestra función objetivo para cumplir con esta restricción.

2.4.2 Envejecimiento Eléctrico

El estrés eléctrico es otro factor importante que contribuye al envejecimiento de los materiales aislantes. El envejecimiento eléctrico se produce debido a la ruptura local de microestructuras, vacíos e irregularidades presentes en el material aislante uniforme [87]. En la literatura (ver la [Tabla 2.3](#)), se han propuesto diferentes combinaciones de modelos de vida, entre ellos el Modelo de Potencia Inversa (IPM), el Modelo de Umbral de Potencia Inversa (IPTM), el Modelo Exponencial (EM) y el Modelo de Umbral Exponencial (4pETM).

Si bien los modelos de vida combinados permiten describir el comportamiento de los materiales aislantes en un amplio rango de tensiones, es importante tener en cuenta que requieren la estimación de un elevado número de parámetros. Esta estimación no siempre es fácil y, a medida que aumenta el número de parámetros, la precisión de la estimación disminuye significativamente. Esto puede resultar en un margen de error elevado en los valores calculados, a pesar de contar con una gran cantidad de datos experimentales [13].

Para analizar el estrés eléctrico, se ha seleccionado el modelo IPTM. Este modelo se caracteriza por tres parámetros, es decir, t_h , E_{t0} , n . Por lo tanto, puede describir la línea de vida eléctrica de un material aislante a una temperatura seleccionada y constante.

$$L_E = t_h \left(\frac{E_h - E_{t0}}{E - E_{t0}} \right)^n \quad (2.68)$$

donde L_E es la vida útil (o tiempo de falla), E es el estrés eléctrico, E_h y t_h son el estrés de referencia y el tiempo de falla relevantes, respectivamente. El parámetro n es el coeficiente de resistencia de tensión. Además, E_{t0} representa el umbral eléctrico, que es el límite por encima

del cual se produce el daño en el material a una temperatura específica θ [15, 94, 97, 98].

Donde ET es el umbral eléctrico a temperatura T

2.4.3 Modelos de vida para estrés combinado

Los modelos de vida propuestos en la literatura para considerar la interacción de los esfuerzos térmicos y eléctricos se obtienen multiplicando el modelo de vida eléctrico y el modelo de vida térmico:

$$L(\theta, E) = G(\theta, E) \cdot L(\theta) \cdot L(E) \quad (2.69)$$

donde G es un coeficiente de corrección cuya expresión depende de los modelos de vida combinados. Para que un modelo de vida combinado sea válido, los dos componentes $L(\theta)$ y $L(E)$ deben cumplir una condición de contorno importante: el modelo de vida combinado debe coincidir con el modelo independiente cuando uno de los dos esfuerzos es cero. En términos analíticos, esto implica que al imponer sucesivamente $E = 0$ o $\theta = 0$ en la ecuación (2.69), se deben obtener los modelos de vida independientes.

Además, los modelos de vida combinados en la ecuación (2.69) deben ser compatibles entre sí. Esto significa que solo se pueden combinar dos modelos de umbral o dos modelos sin umbral. De hecho, los modelos independientes combinados en la ecuación (2.69), en ausencia del respectivo esfuerzo, deben dar el mismo resultado. Es decir, el modelo de vida para el estrés térmico cuando $T=0$ debe coincidir con la duración de vida del modelo de vida eléctrico cuando $E = 0$: $L_{E_0}(E = 0) = L_{\theta_0}(T = 0) = L_0$.

Estas condiciones de contorno y compatibilidad aseguran que el modelo de vida combinado sea coherente y válido, proporcionando resultados confiables y consistentes en diferentes situaciones de esfuerzo. Al cumplir con estas condiciones, podemos utilizar el modelo de vida combinado para evaluar de manera precisa y efectiva la duración de vida de los cables en presencia de esfuerzos térmicos y eléctricos simultáneos.

2.5 Formulación y Técnicas de optimización

En el campo de la optimización, tanto la correcta formulación de los problemas como la elección de las técnicas de optimización son aspectos cruciales para obtener soluciones efectivas en la resolución de problemas complejos. Existen dos enfoques principales en la optimización: el monoobjetivo y el multiobjetivo.

En esta sección, nos centraremos en la formulación y las técnicas de optimización específicas tanto para problemas monoobjetivo como para problemas multiobjetivo. La optimización monoobjetivo se enfoca en la optimización de un único objetivo, mientras que la optimización multiobjetivo busca encontrar un conjunto de soluciones óptimas llamado conjunto de Pareto, donde ninguna solución puede mejorar en al menos un objetivo sin empeorar en otro. Ambos enfoques son fundamentales y se utilizan en diferentes contextos según las necesidades del problema.

2.5.1 Formulación de optimización

Los problemas de optimización son una clase única de problemas que buscan maximizar o minimizar una función matemática de varias variables, teniendo en cuenta ciertas restricciones. En este marco general, se pueden modelar una amplia gama de problemas del mundo real y teóricos. En el mundo real, la mayoría de los problemas de optimización presentan diferentes tipos de restricciones que deben cumplirse para satisfacer criterios de diseño deseados. Estas restricciones, conocidas como restricciones de diseño, agregan complejidad al problema. Por lo tanto, los problemas de optimización se consideran tanto sin restricciones como con restricciones. La categoría de problemas con restricciones se conoce como problema de optimización con restricciones. El término *optimizar* se utiliza comúnmente para referirse a los procesos de maximización o minimización de una función objetivo, la cual suele involucrar múltiples variables. Aunque en algunos casos prácticos la función objetivo puede ser una función de una sola variable, esto no presenta un desafío significativo desde el punto de vista de la optimización. Sin embargo, los problemas de optimización pueden abarcar más de una función objetivo, dando lugar a los problemas de optimización multiobjetivo. En consecuencia, los problemas de optimización se clasifican en problemas monoobjetivo y multiobjetivo, dependiendo de la cantidad de funciones objetivo involucradas.

2.5.1.1 Formulación general monoobjetivo

Muchos problemas de búsqueda y optimización en ciencia e ingeniería implican la necesidad de cumplir con un conjunto de restricciones para obtener una solución óptima. En general, estos problemas se pueden expresar como un problema de programación no lineal [99, 100,

[101, 102] de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{Encontrar } \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\
 & \text{Minimice } f(\mathbf{x}) \\
 & \text{Sujeto a } h_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \\
 & \quad g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, q \\
 & \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{2.70}$$

donde \mathbf{x} denota el vector n -dimensional de variables de decisión; f es la función objetivo, x_i^L y x_i^U son los valores mínimo y máximo permitidos para la i -ésima variable, p es el número de restricciones de igualdad y q es el número de restricciones de desigualdad.

Reconocemos aquí que una restricción del tipo menor o igual se puede transformar en el otro tipo multiplicando la función de restricción por -1. Dado que ninguna de las funciones anteriores (función objetivo o restricciones) se asume como lineal, el problema anterior también se conoce como un Problema de Programación No Lineal o simplemente un problema NLP. Aunque el problema anterior está escrito para minimización, los problemas de maximización también se pueden resolver utilizando el principio de dualidad [103].

Las restricciones de igualdad generalmente se manejan convirtiéndolas en:

$$g_{i+k}(x) \approx h_k(x) - \delta \leq 0$$

esto aumenta el número total de restricciones de desigualdad a $j = q + m$ y el término q en la ecuación (2.70) se puede reemplazar por j para incluir todas las restricciones de desigualdad e igualdad [104].

2.5.1.2 Formulación general multiobjetivo

A diferencia de los problemas de optimización de un solo objetivo, en los problemas multiobjetivo, el objetivo no es encontrar una única solución óptima, sino identificar el conjunto óptimo de Pareto [105, 106, 107, 108, 109]. Este conjunto representa todas las soluciones que no pueden mejorar en al menos un objetivo sin empeorar en otro. Esto se debe a que los objetivos pueden tener naturalezas contradictorias o conflictivas, lo que dificulta la obtención de una única solución óptima que satisfaga todos los objetivos de manera óptima.

Para abordar el problema de optimización multiobjetivo, se formulan las funciones obje-

tivo en su forma general, teniendo en cuenta tanto la minimización como la maximización de los objetivos, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize/Maximize} && f_m(\mathbf{x}), \quad m = 1, 2, \dots, M; \\
 & \text{Subject to} && g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J; \\
 & && h_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K; \\
 & && x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n;
 \end{aligned} \tag{2.71}$$

donde \mathbf{x} un vector de n variables de decisión, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$, y los límites de variables restringen cada variable de decisión x_i para que tome un valor dentro de un límite inferior x_i^L y un límite superior x_i^U . Estos límites constituyen un espacio de decisión. Asociadas con el problema están las restricciones de desigualdad J y de igualdad K . Los términos $g_j(\mathbf{x})$ y $h_k(\mathbf{x})$ se denominan funciones de restricción. Hay M funciones objetivas $F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_M(\mathbf{x})]^T$ consideradas en la formulación anterior. Cada función objetivo puede minimizarse o maximizarse. El principio de dualidad sugiere que podemos convertir un problema de maximización en uno de minimización multiplicando la función objetivo por -1 .

La ecuación (2.71) permite una mayor flexibilidad en la búsqueda de soluciones óptimas que satisfagan los criterios establecidos. A lo largo de la literatura, se han propuesto diversas técnicas y algoritmos específicos para resolver problemas de optimización multiobjetivo, lo que ha llevado a avances significativos en el campo. Algunas referencias relevantes en el área de optimización multiobjetivo incluyen los trabajos de Miettinen [110], Branke [111], Collette [106], y Liu et al. [112]. Estos estudios proporcionan una visión general de los enfoques, métodos y aplicaciones en la optimización multiobjetivo, y ofrecen herramientas valiosas para la resolución de problemas complejos en diversos campos.

2.5.2 Métodos de optimización

En la actualidad, existen diversos métodos de optimización disponibles para abordar problemas de optimización monoobjetivo (2.70) y multiobjetivo (2.71) no lineales con restricciones, lo veremos en seguida. La optimización global, también conocida como la búsqueda de la mejor solución para un problema de optimización que puede tener múltiples óptimos locales, es altamente deseable en campos como el diseño de ingeniería, ciencias de la computación,

investigación operativa, biomedicina y química computacional [113, 114]. En general, los métodos de optimización global se dividen en dos categorías: métodos determinísticos y métodos estocásticos [115, 116]. Cada categoría presenta fortalezas y debilidades particulares. Los enfoques estocásticos ofrecen una solución óptima global con una garantía probabilística, que se acerca a 1 a medida que aumenta el tiempo de computación [117, 118]. Sin embargo, no existe ningún algoritmo capaz de encontrar la solución óptima global con certeza para un problema de optimización general en un tiempo de computación finito [119].

2.5.2.1 Enfoque Determinista

La optimización determinista se refiere a un enfoque de optimización que busca encontrar una solución óptima en un problema específico sin considerar la incertidumbre o la aleatoriedad. Este enfoque se basa en la suposición de que los parámetros y variables del problema son conocidos y constantes. En el ámbito de la optimización no lineal con restricciones, existen diversas técnicas que han demostrado ser efectivas para abordar este tipo de problemas.

Una de las técnicas más utilizadas es la Programación No Lineal (PNL) [120, 121]. La PNL engloba métodos como el método de Newton, el método de los multiplicadores de Lagrange y el método de barrera. Estos métodos se centran en resolver problemas de optimización no lineal con restricciones utilizando técnicas de optimización local. Se basan en la iteración de aproximaciones sucesivas para encontrar una solución óptima dentro de un vecindario local. Otro enfoque ampliamente utilizado es la Programación Cuadrática Secuencial (SQP) [121, 122, 123]. El SQP es un enfoque iterativo que resuelve una secuencia de problemas de programación cuadrática restringida. Combina métodos de optimización local con técnicas de programación cuadrática para encontrar soluciones óptimas. A medida que avanza en las iteraciones, el SQP ajusta los parámetros del problema para acercarse a la solución óptima. La Programación por Restricciones (CP) es otra técnica utilizada en la optimización determinista [124]. La CP combina la búsqueda sistemática y el razonamiento para resolver problemas de optimización con restricciones. Se basa en la idea de que las restricciones proporcionan información valiosa para guiar la búsqueda de soluciones óptimas. La CP ha demostrado ser efectiva en la resolución de problemas complejos con múltiples restricciones.

Fmincon, cuyo nombre proviene de "Function MINimization CONstrained", es ampliamente reconocido como uno de los algoritmos más famosos y utilizados en el enfoque de

terminista de optimización. Como parte del software MATLAB, Fmincon se destaca por su eficiencia y versatilidad en la resolución de problemas de optimización no lineales con restricciones [121]. Ha sido ampliamente aplicado en diversas disciplinas, incluyendo ingeniería, ciencias de la computación, finanzas y física. Fmincon utiliza métodos de programación matemática, como la programación no lineal, para buscar soluciones óptimas, empleando técnicas de optimización local y global para explorar el espacio de búsqueda en busca de puntos estacionarios o mínimos locales y globales. No obstante, es importante tener en cuenta que, aunque Fmincon destaque como un algoritmo popular, existen otros métodos y enfoques deterministas de optimización ampliamente reconocidos y utilizados en la comunidad científica. Estos incluyen métodos basados en gradientes, como el método de Newton y el método de los multiplicadores de Lagrange, así como algoritmos de optimización convexa y no convexa. La elección del algoritmo más adecuado dependerá de las características y propiedades específicas del problema de optimización en cuestión.

2.5.2.2 Enfoque Estocástico

La optimización estocástica considera la incertidumbre y la aleatoriedad en los problemas de optimización. A diferencia de la optimización determinista, donde los parámetros y variables se consideran fijos, en la optimización estocástica se reconocen como variables aleatorias o sujetas a variaciones inciertas [125, 126]. El objetivo de la optimización estocástica es encontrar una solución óptima que sea robusta frente a la incertidumbre y maximice o minimice una función objetivo, teniendo en cuenta las posibles variaciones de los parámetros o variables aleatorias. Esto implica no solo buscar una solución óptima promedio, sino también evaluar y controlar el riesgo asociado a la incertidumbre [127].

Algunas técnicas comunes utilizadas en la optimización estocástica son:

- Optimización por Enjambre de Partículas (PSO, Particle Swarm Optimization): PSO se basa en el comportamiento colectivo de un enjambre de partículas. Cada partícula representa una solución potencial y se mueve en el espacio de búsqueda ajustando su posición y velocidad basándose en su experiencia personal y la información compartida con otras partículas del enjambre [108, 128, 129, 130].
- Algoritmos Genéticos (GA, Genetic Algorithms): Los GA se inspiran en la evolución biológica y utilizan operadores genéticos como selección, recombinación y mutación para

buscar soluciones óptimas. Estos algoritmos trabajan con una población de soluciones y utilizan principios de selección natural para promover la evolución de soluciones de alta calidad [107, 108, 128].

- NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II): El NSGA-II es un algoritmo genético multiobjetivo que utiliza un enfoque basado en el ordenamiento no dominado para encontrar soluciones óptimas en problemas con múltiples objetivos. El algoritmo busca encontrar un conjunto de soluciones no dominadas, lo que implica encontrar un equilibrio entre las diferentes metas u objetivos. NSGA-II también utiliza operadores genéticos y selección basada en dominancia para evolucionar y mejorar las soluciones en cada generación [109, 131].
- Métodos de Monte Carlo (MC): Estos métodos utilizan la generación de muestras aleatorias para estimar la distribución de probabilidad y buscar soluciones óptimas [127].

Es importante destacar que estos algoritmos, junto con Monte Carlo, son solo ejemplos de métodos de optimización estocástica. Hay otros enfoques estocásticos, como la búsqueda aleatoria, el recocido simulado, los algoritmos evolutivos, entre otros, que también se utilizan en la optimización estocástica para abordar problemas con incertidumbre o aleatoriedad.

Estos algoritmos, junto con otros enfoques estocásticos, ofrecen herramientas poderosas para abordar problemas de optimización no lineal con incertidumbre o aleatoriedad, brindando soluciones más robustas y realistas.

Capítulo 3: Desarrollo del Trabajo de Investigación

Los sistemas de cables eléctricos subterráneos de alta tensión desempeñan un papel fundamental en la infraestructura eléctrica moderna. Con el fin de aumentar la ampacidad de transmisión de energía, se utilizan comúnmente rellenos térmicos de baja resistividad alrededor de los cables para mejorar la transferencia de calor entre el cable y el entorno circundante. Esto permite liberar más energía térmica por unidad de tiempo del cable. Con el aumento en la demanda de energía eléctrica y las restricciones en costos y derechos de paso, se ha vuelto esencial optimizar la ampacidad de los cables y la envolvente del relleno. Además, el envejecimiento de los cables es otro aspecto importante a considerar. Los principales factores que afectan al envejecimiento del aislamiento del cable son la temperatura del cable y el estrés eléctrico. La corriente de carga y la temperatura ambiente del suelo generan calor en el interior del cable, lo que resulta en un aumento de la temperatura del conductor. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta la vida útil del aislamiento en la optimización, con el fin de garantizar la confiabilidad del sistema y realizar una planificación adecuada para el futuro.

En este capítulo, con el objetivo de abordar los objetivos establecidos en el capítulo I, se plantea el problema de optimización mono-objetivo y multi-objetivo restringido para el diseño más eficiente de cables de alta tensión. Además, se seleccionarán las técnicas de optimización más adecuadas para llevar a cabo la optimización de estos cables.

3.1 Disposición y modelo de cable

En el Capítulo 2, Sección 2.2, se presentaron ejemplos de instalaciones típicas de cables de alta tensión, y para esta investigación se ha seleccionado específicamente la disposición de cables en lecho de relleno térmico. Esta disposición se utiliza ampliamente en la práctica de la instalación de cables eléctricos subterráneos, ya sea en formaciones planas o en forma de trébol. La elección entre estas configuraciones depende de diversos factores técnicos y prácticos, tales como la conexión adecuada a tierra de las pantallas metálicas, el cálculo preciso

del área de la sección transversal de los conductores y la disponibilidad de espacio óptimo para la instalación de los cables [7, 19, 132]. En este contexto, se ha seleccionado específicamente la instalación trifásica en formación plana con conexión cruzada en las cubiertas con transposición regular, que se asemeja a la Figura 2.10. Esta configuración garantiza que la ampacidad en los tres cables esté equilibrada, lo que resulta en un desempeño óptimo y eficiente del sistema.

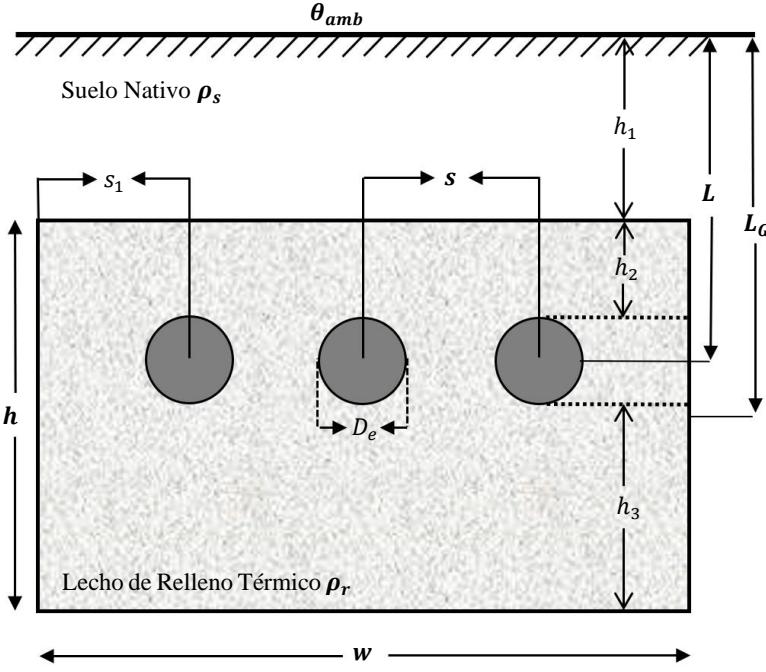


Figura 3.1. Configuración de Cable Subterráneo en Disposición Plana con Relleno Térmico.

En la Figura 3.1 se presenta de manera ilustrativa el método de instalación y la disposición de los cables. En este caso, los cables de potencia son enterrados bajo tierra en una zanja rectangular que está rellena con una capa de material térmico, caracterizado por su resistividad ρ_r . Esta configuración tiene como objetivo principal mejorar el mecanismo de transferencia de calor entre los cables y el medio circundante, lo que contribuye significativamente al incremento de la capacidad de transmisión de energía. Además, la Figura 3.1 proporciona una representación visual de todas las variables de diseño relevantes que deben ser consideradas en el problema de optimización. Estas variables abarcan aspectos fundamentales, tales como las dimensiones de la zanja, como la profundidad de tendido (L), la profundidad del centro del relleno (L_G), la separación equidistante entre los cables (s), el espesor y el ancho del relleno (h, w). Asimismo, se incluyen la resistividad térmica del suelo (ρ_s) y otros parámetros esenciales para garantizar un óptimo desempeño del sistema. Estos

parámetros juegan un papel crucial en la eficiencia y la estabilidad de la instalación, ya que influyen directamente en la ampacidad del cable y en la capacidad de conducción térmica del suelo. Por lo tanto, es imperativo considerar y analizar cuidadosamente cada una de estas variables durante el proceso de optimización, a fin de obtener un diseño óptimo y eficiente del sistema.

Tabla 3.1. Parámetros y especificaciones del cable XLPE de 220 kV [9].

Descripción	Símbolo y unidad	Cable de 220 kV
Conductor		
Sección transversal del conductor	S (mm^2)	Milliken - 5 seg. Cu
Diámetro del conductor	d_c (mm)	2000 RSM
Espesor de la pantalla semiconductora	t_{cs} (mm)	54.5
		2
Aislamiento		
Espesor del aislamiento	t_i (mm)	24.0
Diámetro exterior del aislamiento	D_i (mm)	110.5
Cubierta		
Espesor de la cubierta de aluminio	t_s (mm)	2.8
Diámetro exterior de la vaina	D_s (mm)	117.7
Cubierta externa		
Espesor de la cubierta exterior	t_{ce} (mm)	5.0
Diámetro exterior del cable	D_e (mm)	147.7
Parámetros físicos		
Temperatura máxima del conductor	θ_{max} ($^\circ\text{C}$)	90
Frecuencia fundamental	f(Hz)	60
Constante dieléctrica del aislamiento	ϵ	2.3
Factor de pérdida de aislamiento	$\tan\delta$	0.001
Resistencia del conductor a 20 °C	R_{20} (Ω/km)	0.0090
Constante de efecto de proximidad	k_p	0.37
Efecto piel constante	k_s	0.435
Coeficiente de temperatura de Cu	α_{20}	3.09×10^{-3}
coeficiente de temperatura de Al		4.03×10^{-3}
Tensión nominal -	U_0 (kV)	220

RMS: por sus siglas en inglés Round Multiwire Segmented conductor (Milliken construction).

Es relevante tener en consideración la posible presencia de una capa superficial de material cercana a la superficie del suelo, la cual puede presentar una resistividad térmica distinta a la del relleno térmico utilizado. Esta capa superficial puede estar compuesta por un material protector, asfalto [41, 133] o suelo que se ha secado debido a la exposición a la radiación solar, lo que incrementa su resistividad térmica. No obstante, para simplificar el

problema, se asume que esta capa superficial posee el mismo valor de resistividad térmica que el suelo nativo y el material de relleno. De esta manera, se considera que únicamente existen dos materiales diferentes que rodean los cables. Esta suposición permite simplificar el análisis y la modelización del sistema, al reducir la complejidad de tener en cuenta múltiples capas de distintos materiales en la proximidad de los cables. Aunque en la realidad podrían existir variaciones en las propiedades térmicas de las capas cercanas a la superficie del suelo, se considera un enfoque simplificado al asumir que la capa superficial tiene características térmicas equivalentes al suelo nativo y al relleno térmico utilizado. Esta simplificación facilita el estudio y la optimización del sistema de cables subterráneos, manteniendo un equilibrio adecuado entre la precisión del modelo y la complejidad del análisis.

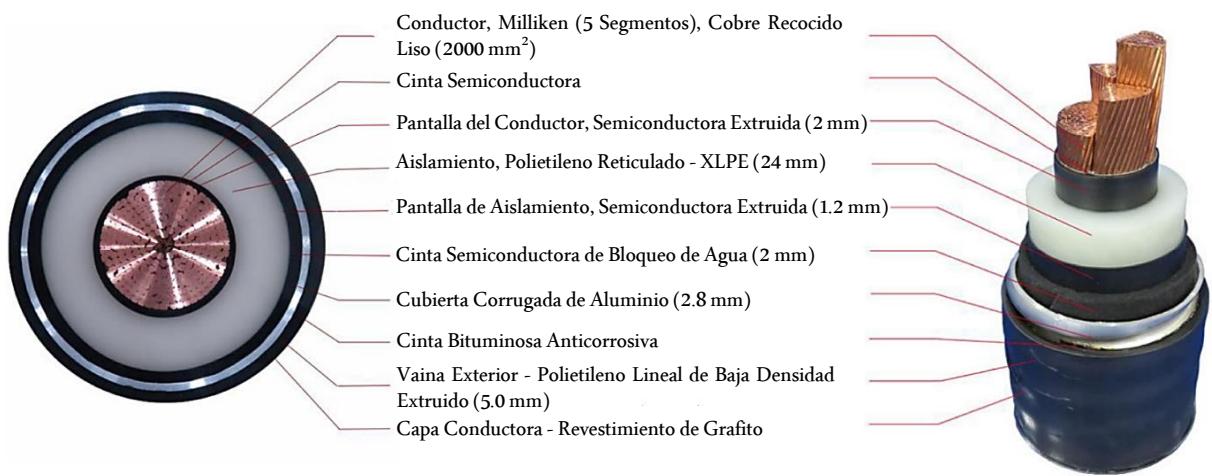


Figura 3.2. Sección trasversal del cable de 220 kV con aislamiento XLPE [9].

En el contexto del modelo de cable, es ampliamente reconocido el uso frecuente del diseño de conductores del tipo Milliken o segmentario para reducir de manera significativa las pérdidas de corriente alterna en conductores con secciones transversales considerablemente grandes. Las [Figura 2.3](#) y [Figura 3.2](#) exhiben una representación transversal de un conductor Milliken. La elección de los conductores Milliken se fundamenta en su capacidad para minimizar los efectos de la piel y el efecto de proximidad [6, 11, 134, 135]. Al reducir estos efectos no deseados, se logra mejorar la eficiencia y la capacidad de transmisión de los cables subterráneos. Además, estos conductores especiales brindan flexibilidad y resistencia mecánica, lo que les permite soportar las tensiones y los movimientos generados en el entorno subterráneo.

En este estudio, se utilizó un cable con aislamiento XLPE, cubierta corrugada y sin armadura. Este tipo de cable ofrece excelentes propiedades dieléctricas y resistencia a altas

temperaturas. La Figura 3.2 muestra una representación visual detallada del modelo de cable utilizado en el estudio. Además, en la Tabla 3.1 se detallan las especificaciones del cable, incluyendo información crucial como la sección transversal, el material conductor, la resistencia eléctrica y otras características relevantes. Estos datos son fundamentales para comprender y evaluar el rendimiento del cable en el contexto de la investigación.

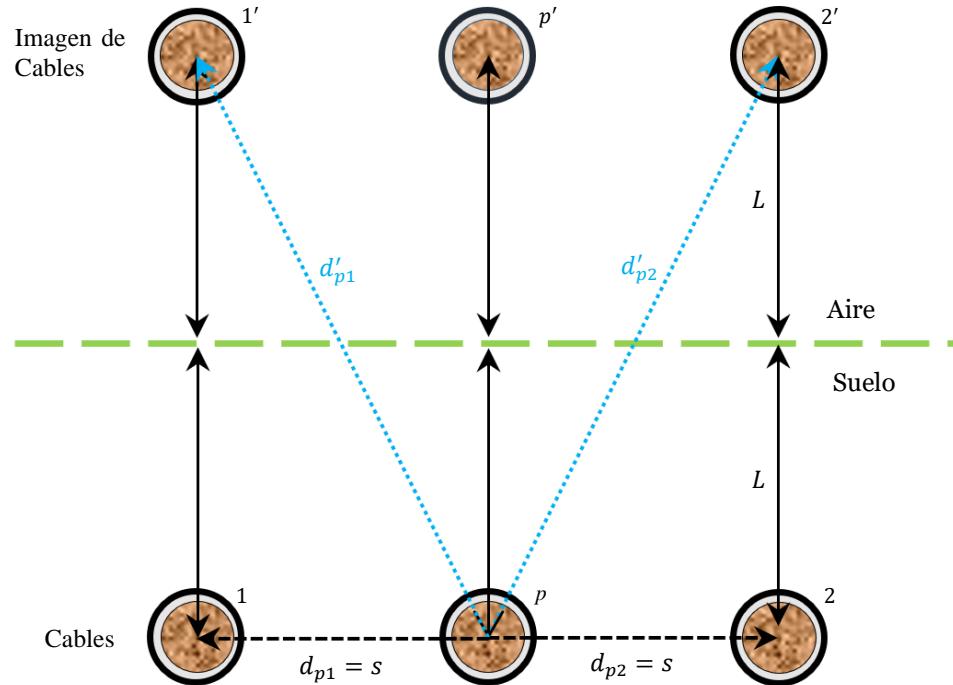


Figura 3.3. Disposición de cables para calcular el calentamiento mutuo.

3.2 Calculo de resistencia térmica externa

Para determinar la resistencia térmica externa, según la ecuación (2.58), es fundamental calcular el factor F , el cual tiene en cuenta el efecto de calentamiento mutuo de los cables. En un sistema donde múltiples cables están cargados de manera igual y idéntica y están ubicados bajo tierra, se aplica el principio de superposición. Este principio considera que cada cable actúa como una fuente de línea independiente y no afecta el campo de calor de los demás cables. Para asegurar que esta suposición sea aproximadamente válida, es necesario que los cables estén separados axialmente por al menos dos diámetros de cable. En caso de que el principio de superposición no sea aplicable, se aborda en la Sección 9.6.3 de [10]. Para iniciar el cálculo del factor F en la disposición plana, como se muestra en la Figura 3.3, se procede de la siguiente manera:

$$F = \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \right] = \left(\frac{\sqrt{s^2 + (2L)^2}}{s} \right) \left(\frac{\sqrt{s^2 + (2L)^2}}{s} \right) = 1 + \left(\frac{2L}{s} \right)^2 \quad (3.1)$$

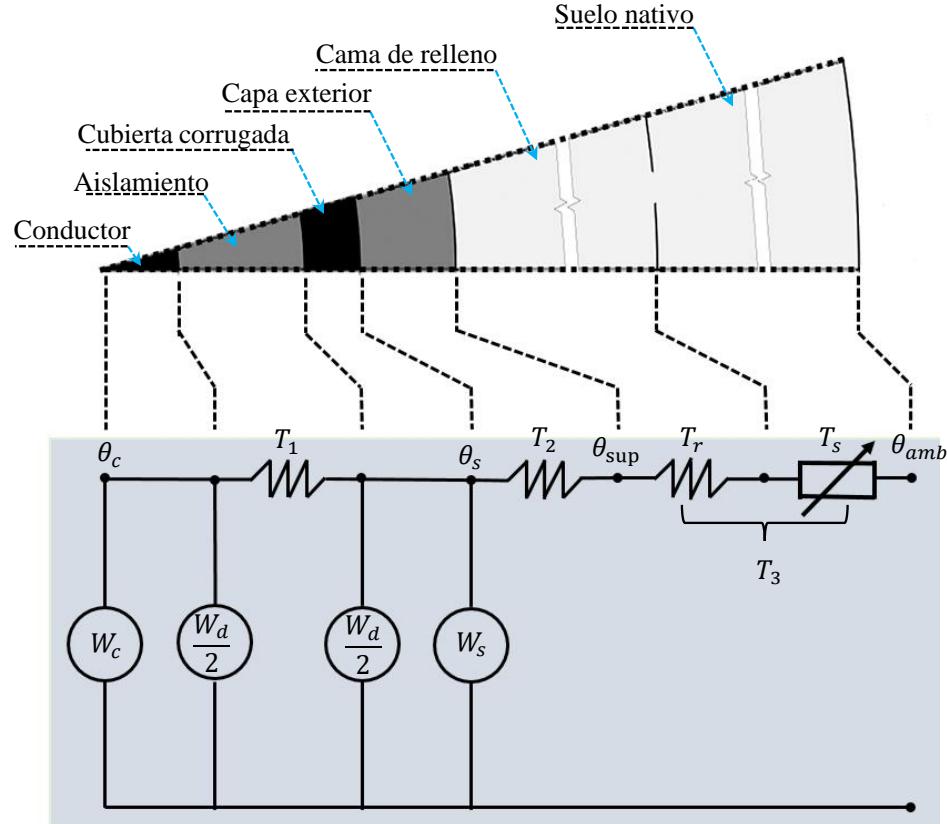


Figura 3.4. Modelo de Red de Equivalencia Termoeléctrica para Cable Enterrado.

En la práctica, los valores de u son mayores a 10 [136], es posible aproximar el factor $\sqrt{u^2 - 1}$ en la ecuación (2.58) utilizando la serie de Taylor. Esta aproximación se expresa como $\sqrt{u^2 - 1} = u - \frac{1}{4u} + \dots$. Por lo tanto, el factor $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ se puede aproximar como $2u = \frac{4L}{D_e}$. Al sustituir esta aproximación, junto con la ecuación (3.1), en la ecuación (2.58), se obtiene:

$$T_3 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln \left\{ \left(\frac{4L}{D_e} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{2L}{s} \right)^2 \right] \right\} + \frac{N}{2\pi} (\rho_s - \rho_r) G_b \quad (3.2)$$

El factor geométrico G_b incluye los parámetros de diseño, como L_G y el radio equivalente. Por lo tanto, el valor de G_b se transforma en

$$G_b = \ln \left(u_b + \sqrt{u_b^2 - 1} \right) \approx \ln \left(\frac{2L_G}{r_b} \right) = \ln \left(\frac{4L_G}{h} \right) - \frac{h}{2w} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{h}{w} \right) \ln \left(1 + \frac{w^2}{h^2} \right)$$

3.3 Cálculo de la ampacidad del cable

La Figura 3.4 ofrece una representación clara de la red de equivalencia termoeléctrica del cable. En esta figura, se detallan las diferentes resistencias térmicas que componen el circuito, incluyendo las pérdidas del conductor (W_c), la cubierta de aluminio corrugado (W_s) y el dieléctrico (W_d), expresadas en términos de potencia por unidad de longitud (W/m). Además, se visualizan las temperaturas correspondientes asociadas a cada componente.

La ampacidad del cable, que refleja las pérdidas en su estructura, se expresa mediante la ecuación (2.62). Sin embargo, es fundamental realizar ciertas aclaraciones respecto a algunos factores. El factor λ_s se refiere al factor de pérdida de la cubierta corrugada, y se obtiene a través de la ecuación (2.32), al reemplazar la ecuación λ'_1 (2.37) y las pérdidas por factor de pérdida Foucault λ''_1 (2.43). Estos aspectos no se descuidan en secciones de gran tamaño. Cabe destacar que en el caso específico de este cable, se supone que las pérdidas en la armadura (λ_a) son nulas, ya que el cable carece de esta capa de protección.

Asimismo, definimos T_1 como la resistencia térmica de la capa de aislamiento, T_2 como la resistencia térmica de la cubierta exterior o capa externa del cable, y T_3 como la resistencia térmica entre la superficie del cable y el medio circundante. Todas estas resistencias térmicas se expresan en unidades de K· m/W. Es importante resaltar que en la ecuación (2.62), se asume que T_3 cumple la función que anteriormente correspondía a T_4 , debido a la ausencia de una capa de armadura en el cable en cuestión.

Con el fin de simplificar la expresión de la ampacidad del cable en la ecuación (2.62)), se definen los parámetros a , b , c y d de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} a &= \Delta\theta - W_d(0.5T_1 + nT_2) \\ b &= -n.W_d \\ c &= R_{ac}.T_1 + nR_{ac}(1 + \lambda_s).T_2 \\ d &= nR_{ac}.(1 + \lambda_s) \end{aligned} \tag{3.3}$$

donde $\Delta\theta$ representa la diferencia de temperatura entre la temperatura del conductor (θ_c) y la temperatura ambiente (θ_{amb}). Para calcular la ampacidad, se considera una temperatura máxima de 90 °C para el conductor, como se indica en la Tabla 3.1. De esta manera, se realiza un análisis de la capacidad máxima del cable XLPE.

Al reemplazar las ecuaciones anteriores (3.3) en la ecuación (2.62), obtenemos una expresión más resumida de la siguiente forma:

$$I = \left(\frac{a + b \cdot T_3}{c + d \cdot T_3} \right)^{0.5} \quad (3.4)$$

Al reemplazar la ecuación (3.2) en la ecuación anterior (3.4), podemos obtener una expresión de la ampacidad que se presenta como una función de varias variables:

$$I = \left[\frac{a + b \left(\frac{\rho_r}{2\pi} \ln \left\{ \frac{4L}{D_e} \left[1 + \left(\frac{2L}{s} \right)^2 \right] \right\} + \frac{N(\rho_s - \rho_r)}{2\pi} G_b \right)}{c + d \left(\frac{\rho_r}{2\pi} \ln \left\{ \frac{4L}{D_e} \left[1 + \left(\frac{2L}{s} \right)^2 \right] \right\} + \frac{N(\rho_s - \rho_r)}{2\pi} G_b \right)} \right]^{0.5} \quad (3.5)$$

Es importante resaltar que en esta investigación se utiliza un enfoque estacionario en lugar de uno transitorio. El estado estacionario se refiere a una condición en la cual todas las variables del sistema eléctrico o térmico se mantienen constantes con el tiempo. Esto implica que las condiciones de temperatura, flujo de corriente y distribución de calor se estabilizan y no varían significativamente a lo largo del tiempo. Bajo estas condiciones, se asume que el sistema ha alcanzado un equilibrio térmico y eléctrico.

Tabla 3.2. Parámetros del modelo de cable

Descripción	Símbolo y unidad	Valor
Factor de pérdida de armadura	λ_a	0
Resistencia térmica del aislamiento	T_1 (K·m/W)	0.349
Resistencia térmica de la cubierta exterior	T_2 (K·m/W)	0.0857
Pérdidas dieléctricas	W_d (W/m)	2.4644
Resistividad térmica del relleno	ρ_r (K·m/W)	0.5
Resistividad térmica del suelo	ρ_s (K·m/W)	2.5
Temperatura ambiente	θ_{amb} (°C)	25

En la ecuación (3.5), es crucial tener en cuenta que los valores de la resistividad térmica del relleno (ρ_r), la resistividad térmica del suelo (ρ_s) y la temperatura ambiente (θ_{amb}) se consideran como constantes, según se indica en la Tabla 3.2. Sin embargo, en la realidad, estos parámetros no se mantienen constantes a lo largo de la ruta del cable debido a diversas condiciones climáticas, variaciones estacionales y el desgaste propio del cable con el tiempo. En las próximas secciones, se analizarán en detalle estos aspectos.

3.4 Costo de instalación

Con el fin de optimizar el proceso de relleno y garantizar una ampacidad adecuada, es necesario realizar un análisis detallado de los factores que influyen en los costos, tal como se muestra en la [Tabla 3.3](#). La fase de excavación implica la creación de zanjas subterráneas mediante el uso de maquinaria especializada para realizar el corte y la modelación del terreno. Durante esta etapa, se extrae la tierra existente para permitir la instalación de los cables y del material de cama de relleno. Posteriormente, se debe gestionar adecuadamente la tierra excavada, incluyendo su transporte y depósito en una ubicación designada. La cama de relleno térmico es crucial en los sistemas de cables subterráneos, ya que facilita una dissipación eficiente del calor generado por los cables. Este material especializado garantiza un funcionamiento óptimo al mantener una temperatura adecuada, asegurando un rendimiento confiable del sistema. Sin embargo, debido a su naturaleza especializada y a sus propiedades térmicas superiores, el material de relleno térmico tiende a tener un costo más elevado en comparación con los gastos asociados a la excavación y eliminación de tierra.

Tabla 3.3. Parámetros de costo para la optimización del relleno y ampacidad. [[17](#), [18](#), [19](#)].

Tarea	Base de costos	Término de costo
Excavación	\$ $16.5/m^3$	$w \cdot L_G + w \cdot \frac{h}{2}$
Eliminación de tierra	\$ $13.5/m^3$	$w \cdot L_G + w \cdot \frac{h}{2}$
Relleno con arena térmica	\$ $28.5/m^3$	$w \cdot h - (3/4)\pi D_e^2$

Es fundamental tener en cuenta que los costos totales de instalación de cables subterráneos pueden variar considerablemente según las características del proyecto, como la longitud, profundidad y ancho de excavación, así como las condiciones del terreno y otros gastos asociados, como la mano de obra, la eliminación de tierra y el costo del material de relleno. Además, es importante mencionar que el costo del cable para una sección transversal fija se mantiene constante. Todos estos elementos mencionados pueden ser expresados conjuntamente en una función de costo. Basándonos en los valores proporcionados en la [Tabla 3.3](#) y en la [Figura 3.1](#), podemos formular una función de costo como:

$$C(h, w, L_G) = 30w \cdot L_G + 43.5(w \cdot h) - 28.5 \left(\frac{3}{4}\pi D_e^2 \right) \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) se formula específicamente en función de la profundidad del centro del relleno (L_G) y el espesor y ancho del relleno (h, w), los cuales desempeñan un papel significativo en los costos asociados. En este estudio, es importante destacar que se varían las dimensiones del relleno térmico con el objetivo de encontrar un equilibrio entre el volumen de relleno y el costo, con el fin de mejorar la ampacidad. Se asume que el diámetro del cable (D_e) es un parámetro constante, sin embargo, es posible considerar la variación del tamaño del diámetro para seleccionar el cable adecuado, lo cual dependerá del tipo de proyecto, ya sea que se encuentre en fase de planificación o si el proyecto ya está en funcionamiento.

3.5 Optimización Mono - Objetivo

3.5.1 Formulación del problema de optimización I

El problema de optimización de la ampacidad es un problema monoobjetivo que se aborda mediante la formulación de la ecuación (2.70) y la consideración de las restricciones pertinentes. A continuación, se presenta la formulación del problema de optimización:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar} \quad F(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x}) \\
 & \text{s.t: } C \leq C_1 \\
 & \quad 0.6 \leq h \leq w \\
 & \quad L \geq 0.5 \\
 & \quad w \geq 2(0.3) + 2s \\
 & \quad h_1 = L_G - \frac{h}{2} \geq 0.2 \\
 & \quad 1.3 \leq h_1 + h_2 + h_3 + D_e = L_G + \frac{h}{2} \leq 3 \\
 & \quad x_i^{\{L\}} \leq x_i \leq x_i^{\{U\}}, \quad i = 1, 2, \dots, 6
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

En esta formulación, se sugiere que s_1 sea de al menos 0.3 m a cada lado del centro de los cables exteriores. Además, se consideran las restricciones relacionadas con el presupuesto requerido C_1 y las restricciones físicas de la instalación. También se debe incorporar en la formulación la corriente de carga necesaria del cable I_{carga} , es decir, asegurarnos de que $I \leq I_{carga}$, en caso de buscar una especificación más detallada.

Para abordar este problema, se consideran variables de diseño clave, presentadas en la

Tabla 3.4. Límites de las variables de diseño.

Variable	Límite inferior (m)	Límite superior (m)
$L = x_1$	0.5	2
$L_G = x_2$	0.6	4
$w = x_3$	1.2	4
$h = x_4$	0.6	3
$s = x_5$	$D_e \approx 0.147$	2

Tabla 3.4, que determinan la configuración de la instalación subterránea. Estas variables tienen valores asignados, pero están sujetas a restricciones físicas y económicas para garantizar la viabilidad del proyecto. En la [Figura 3.1](#) se presentan los límites de las variables de diseño, detallados también en las tablas (3.3) y (3.4). El límite inferior está definido por condiciones físicas, mientras que el límite superior se determina considerando el costo y la corriente de carga. Estos límites están respaldados por las referencias [7, 19, 45, 80, 137].

3.5.2 La estructura propuesta del algoritmo genético (GA)

El AG es ampliamente utilizado y efectivo en la optimización [126]. Su flexibilidad para manejar restricciones y medidas de calidad, trabajar con variables continuas y discretas, y su manejo eficiente de un amplio espacio de búsqueda lo convierten en una elección preferida para resolver problemas complejos [138, 139, 140]. Además, el AG puede proporcionar múltiples soluciones óptimas y aprovechar técnicas de computación paralela para acelerar el tiempo de procesamiento [141]. Sin embargo, al igual que otras técnicas de optimización estocástica, el GA proporciona una garantía débil de la solución óptima global; esta garantía es solo en forma probabilística y disminuirá cuando el tamaño del problema aumente [142].

A lo largo de más de cuatro décadas, se han realizado desarrollos significativos en los componentes del AG, como la codificación de cromosomas, el cruce, la mutación, la evaluación, la selección y la estructura del algoritmo [126]. Estos avances han mejorado considerablemente el poder y la eficacia del AG en comparación con su versión tradicional.

Se han logrado avances en los diferentes componentes del AG, incluyendo técnicas de codificación real y cromosomas de longitud variable, así como mejoras en los operadores de cruce y mutación. También se han explorado enfoques híbridos que integran otros algoritmos heurísticos en el AG para mejorar su rendimiento [126, 143]. Sin embargo, implementar un AG híbrido puede ser complicado y su capacidad para explorar el espacio de búsqueda

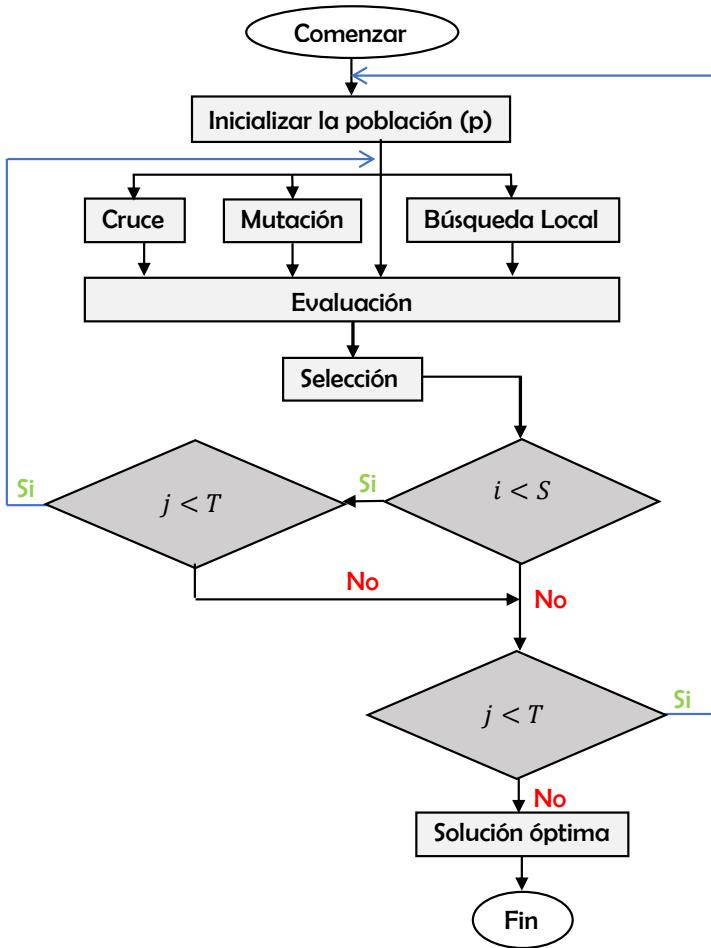


Figura 3.5. La estructura propuesta de los algoritmos genéticos.

sigue siendo limitada debido a la inicialización aleatoria de las soluciones. Para mejorar la exploración, se han utilizado estrategias como el procedimiento de multi-start [144, 145], que consiste en ejecutar el AG varias veces y considerar la mejor solución obtenida como la solución óptima global [144, 145, 146]. Sin embargo, este enfoque puede ser ineficiente en problemas de gran escala que requieren un tiempo de cómputo considerable.

Para abordar las limitaciones mencionadas, Beasley, Bull y Martin [147] propusieron un enfoque más avanzado de multi-start para el GA. En este enfoque, GA se ejecuta secuencialmente varias veces, y cada ejecución finaliza si no se produce ninguna mejora de aptitud después de un número específico de generaciones o cuando se alcanza el número máximo de generaciones. Sin embargo, este enfoque no abordó el efecto de los cromosomas elite, que se seleccionan para pasar a la siguiente generación debido a su alta calidad [148, 149]. Para superar estas limitaciones, en este estudio se propone un enfoque innovador llamado *GA de reinicio adaptativo*. Este enfoque tiene como objetivo mejorar la capacidad de búsqueda del AG al reiniciar el proceso de búsqueda cuando se queda atrapado en óptimos locales y

aprovechar estratégicamente los cromosomas elite para aumentar la probabilidad de encontrar la solución óptima global. El algoritmo propuesto combina la reinicialización del AG con la utilización de los cromosomas elite, lo que permite obtener soluciones de mayor calidad en problemas de optimización. Además, el AG cuenta con un módulo de generación de soluciones locales integrado dentro del ciclo del AG para mejorar la explotación del mismo. Este módulo de generación de soluciones locales se basa en operadores de búsqueda específicos que permiten explorar el espacio de búsqueda de manera más efectiva y encontrar soluciones cercanas a los óptimos locales. Al combinar la exploración global con la explotación local, se mejora la capacidad del algoritmo para encontrar soluciones de alta calidad.

Algorithm 1 Algoritmo Genético Propuesto

- 1: Establecer los parámetros N, C, M, S, T, E y tamaño de la búsqueda local ms del GA.
 - 2: Inicializar la población de cromosomas, es decir, la solución \mathbf{X} .
 - 3: Establecer la generación actual del AG $i = 1$.
 - 4: Establecer la generación actual del GA de reinicio adaptativo $j = 1$.
 - 5: Calcular la aptitud de los cromosomas $F_i^j = f(\mathbf{X}_i^j)$, $\forall i$, y encontrar el índice del mejor cromosoma $b \in \{1, 2, \dots, N\}$.
 - 6: Realizar la selección de cromosomas, el cruce y la mutación de descendientes para formar un nuevo conjunto de cromosomas $\mathbf{X}_i^{j+1}, \forall i$.
 - 7: Evaluar la aptitud $F_i^{j+1} = f(\mathbf{X}_i^{j+1})$, $\forall i$, e identificar el mejor cromosoma $b1$.
 - 8: Si $F_i^{j+1} < F_i^j$, entonces $b = b1$ y $i = 0$
 - 9: Si $i \geq S$
 - 10: Tomar el mejor cromosoma b y colocarlo en el conjunto de población inicial \mathbf{X} .
 - 11: Generar de forma aleatoria el resto de los cromosomas de la población inicial.
 - 12: Reiniciar la generación actual del AG $i = 1$.
 - 13: Incrementar la generación actual del GA de reinicio adaptativo $j = j + 1$.
 - 14: Realizar una búsqueda local para mejorar algunos cromosomas seleccionados en \mathbf{X} .
 - 15: $j < T$
 - 16: $i = i + 1$
 - 17: Volver al paso 7.
 - 18: Imprimir la mejor solución encontrada \mathbf{X}_b
-

La estructura general propuesta para GA se presenta en el [Algoritmo 1](#) y en la [Figura 3.5](#). En este esquema, el valor i representa el número actual de generaciones en el bucle más pequeño, donde no se mejora la mejor solución obtenida. Además, S indica el número máximo de generaciones consecutivas en las cuales el valor de aptitud de la mejor solución obtenida hasta el momento no mejora. Por otro lado, el valor j corresponde a la generación actual del AG propuesto; si supera el número máximo de generaciones T , el GA finalizará.

Este GA presenta una innovación significativa con respecto a los GAs tradicionales: incorpora un componente llamado "búsqueda local", que permite mejorar tanto la exploración

como la explotación del espacio de búsqueda. Cuando el GA reinicia su proceso de búsqueda, se toma únicamente el mejor cromosoma obtenido hasta el momento y se lo coloca en el conjunto de población inicial para la nueva evolución; los demás cromosomas en este conjunto se generan de forma aleatoria.

Es importante destacar que para maximizar el rendimiento del GA, se requiere un equilibrio adecuado entre la exploración y la explotación. En el caso del GA propuesto, dicho equilibrio puede lograrse mediante la selección de parámetros apropiados por parte del usuario, tales como el tamaño de la población (P), la tasa de cruce (C), la tasa de mutación (M), la condición de reinicio adaptativo (R) y los cromosomas élite garantizados para pasar a la siguiente generación (E). Cabe señalar que los parámetros C y M en este estudio representan el número de cromosomas que son sometidos a las operaciones de cruce y mutación, respectivamente. Estos parámetros tienen un papel crucial en el comportamiento y la eficacia del GA propuesto.

3.5.3 La estructura propuesta del algoritmo Enjambre de Partículas (PSO)

La resolución de un problema de optimización con restricciones, definido por la ecuación (3.7), representa un desafío al tener que manejar restricciones en forma de igualdades y desigualdades. Para abordar esta problemática, se han propuesto diversos enfoques, siendo el uso de funciones de penalización el más común en la comunidad de algoritmos evolutivos. Sin embargo, estas funciones presentan inconvenientes, como la necesidad de ajustar múltiples parámetros, lo cual dificulta encontrar la combinación óptima [101, 150]. Además, la búsqueda de soluciones puede ser lenta y no se garantiza alcanzar la solución óptima.

Con el objetivo de superar estas limitaciones, se han realizado modificaciones a los algoritmos utilizando el concepto de funciones de penalización libres de parámetros [104, 150, 151]. En otras palabras, se busca resolver el problema sin restricciones en un espacio de búsqueda mediante una función objetivo F modificada. En este estudio, empleamos la función de penalización autoadaptativa para transformar la función objetivo f en la función F modificada, siguiendo la siguiente formulación:

$$F(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x}) + \lambda \sum_{j=1}^J g_j(\mathbf{x}) \quad (3.8)$$

El propósito de introducir un parámetro de penalización λ (un número muy grande) es

asegurar que la violación de la restricción $g_i(x)$ sea del mismo orden de magnitud que el valor de la función objetivo $I(x)$. En el caso de restricciones de igualdad, se suele abordar convirtiéndolas en aproximaciones de restricciones de desigualdad, de la forma $g_{(i+k)}(x) \approx h_k(x) - \delta \leq 0$. Esto implica que el número total de restricciones de desigualdad se incrementa a $j = q + m$, donde q es el número inicial de restricciones de desigualdad y m es el número de restricciones de igualdad. Por lo tanto, el término q en la ecuación (3.8) se reemplaza por j para incorporar tanto las restricciones de desigualdad como las de igualdad.

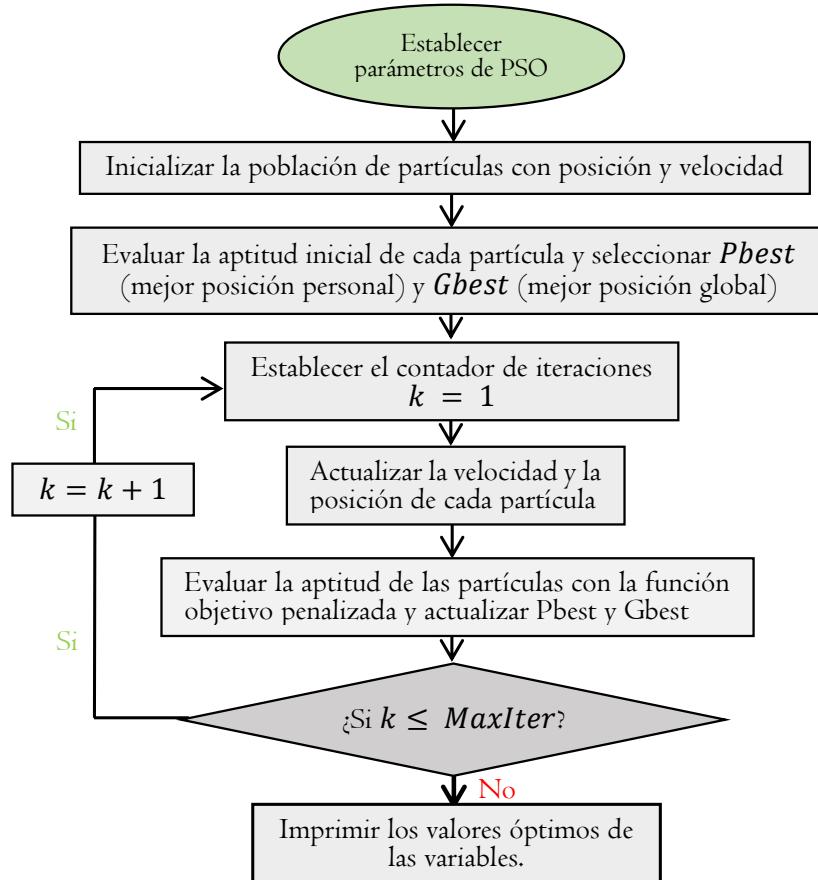


Figura 3.6. Diagrama de flujo de PSO.

En esta sección, examinaremos el uso del algoritmo PSO como una alternativa a GA al implementar una función de penalización. La implementación de una función de penalización en GA puede resultar compleja y desafiante debido a la necesidad de equilibrar las restricciones y los objetivos de optimización. Por el contrario, el PSO es el método de optimización más común y se destaca entre otras técnicas, como el algoritmo genético, debido a su facilidad de aplicación, pocos parámetros ajustables y alta tasa de convergencia rápida [152, 153]. Desarrollado por Kennedy y Eberhart en 1995 [154], el PSO se basa en la inteligencia colectiva y en el comportamiento de agrupación observado en la naturaleza.

Este algoritmo estocástico y robusto se adapta eficientemente a la optimización de funciones no lineales en espacios multidimensionales, y ha sido aplicado con éxito en diversos problemas del mundo real [155]. El PSO ha ganado popularidad en el campo de la inteligencia computacional debido a su eficacia en la resolución de problemas estocásticos de la vida real [153, 156, 157]. Además, ha sido ampliamente utilizado y reconocido en la literatura de inteligencia computacional, metaheurísticas y optimización, gracias a su versatilidad y aplicabilidad en campos como la ciencia y la ingeniería [158].

Algorithm 2 Pseudocódigo para PSO

- 1: Establecer los parámetros w_{\min} , w_{\max} , c_1 , y c_2 de PSO.
 - 2: Inicializar la población de partículas con posiciones \mathbf{X} y velocidades \mathbf{V} .
 - 3: Establecer la iteración $k = 1$.
 - 4: Calcular la aptitud de las partículas $F_i^k = f(\mathbf{X}_i^k)$, $\forall i$, y encontrar el índice de la mejor partícula b .
 - 5: Establecer $\mathbf{Pbest}_i^k = \mathbf{X}_i^k$, $\forall i$, y $\mathbf{Gbest}^k = \mathbf{X}_b^k$.
 - 6: $w = w_{\max} - k \cdot (w_{\max} - w_{\min}) / Maxite$.
 - 7: Actualizar la velocidad y posición de las partículas.

$$V_{i,j}^{k+1} = w V_{i,j}^k + c_1 \cdot \text{rand}((\mathbf{Pbest}_{i,j}^k - X_{i,j}^k) + c_2 \cdot \text{rand}((\mathbf{Gbest}_j^k - X_{i,j}^k)); \forall i \text{ y } \forall j$$

$$X_{i,j}^{k+1} = X_{i,j}^k + V_{i,j}^{k+1}; \forall i \text{ and } \forall j$$
 - 8: Evaluar la aptitud $F_i^{k+1} = f(\mathbf{X}_i^{k+1})$, $\forall i$, y encontrar el índice de la mejor partícula $b1$.
 - 9: Actualizar el Pbest de la población $\forall i$.
Si $F_i^{k+1} < F_i^k$, entonces $\mathbf{Pbest}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^{k+1}$, de lo contrario $\mathbf{Pbest}_i^{k+1} = \mathbf{Pbest}_i^k$.
 - 10: Actualizar el Gbest de la población.
Si $F_{b1}^{k+1} < F_b^k$, entonces $\mathbf{Gbest}^{k+1} = \mathbf{Gbest}_{b1}^{k+1}$, y establecer $b = b1$, de lo contrario $\mathbf{Gbest}^{k+1} = \mathbf{Pbest}^k$.
 - 11: Si $k < Maxite$, entonces $k = k + 1$ y regresar al paso 6, de lo contrario ir al paso 12.
 - 12: Imprimir la solución óptima como \mathbf{Gbest}^k .
-

La población del PSO se denomina enjambre, y cada individuo en esta población se conoce como partícula. Cada partícula tiene un valor de aptitud evaluado por la función de aptitud a optimizar, así como una velocidad que guía su movimiento. El sistema se inicializa con una población de soluciones aleatorias y busca óptimos actualizando generaciones sucesivas. Cada partícula se mueve en dirección a su posición óptima anterior (Pbest) y a la posición global óptima (Gbest) dentro del enjambre, para encontrar la solución óptima. La velocidad y la posición de cada partícula se describen en detalle en [156, 159]. Se utilizan los coeficientes de aceleración c_1 y c_2 para controlar la influencia de la experiencia individual y colectiva, respectivamente. Además, se emplean variables aleatorias uniformemente distribuidas r_1 y r_2 , en el rango $[0,1]$, para introducir un componente de exploración aleatoria. Un factor de inercia (w) se emplea para equilibrar la exploración y la explotación durante el proceso de

búsqueda, y su valor varía entre los límites mínimos (w_{min}) y máximos (w_{max}) para regular la velocidad de convergencia y la diversidad del enjambre, [128, 160, 161]. La velocidad inicial de la población se define como $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \dots, \mathbf{V}_N]^T$, donde cada partícula \mathbf{X}_i tiene una velocidad calculada como $\mathbf{V}_i (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{iD})$.

La implementación del algoritmo PSO se detalla en el [Algoritmo 2](#), siguiendo las referencias [128, 153]. Para obtener una visualización más detallada del proceso de optimización en PSO, consulte el diagrama de flujo en la [Figura 3.6](#), el cual muestra de manera clara y concisa los pasos esenciales involucrados.

3.5.4 Resultados y discusiones I

En este estudio, se presenta un diseño de instalación que se muestra en la [Figura 3.1](#), con una transposición regular en la disposición de los cables, intercambiando periódicamente sus posiciones relativas a lo largo del sistema (ver [Figura 2.10](#)). Este enfoque permite obtener un promedio de los efectos de la interacción electromagnética, lo que conlleva a reducir las pérdidas de energía y minimizar las interferencias. Además, se garantiza una distribución equilibrada de la carga, asegurando que los tres cables tengan la misma ampacidad. Esta consideración es fundamental para garantizar una operación eficiente y confiable del sistema eléctrico subterráneo.

Tabla 3.5. Conjunto de parámetros seleccionados de los algoritmos propuesto.

Parametros del algoritmo	Símbolo	Valor
GA		
Tamaño de la población	P	100
Tasa de cruce	C	80
Tasa de mutación	M	1
Condición de reinicio adaptativo	R	5
Cromosomas élite	E	7
PSO		
Tamaño de la población	P	100
Peso de inercia	w	0.9
Relación de amortiguación de la inercia	d	0.88
Coeficiente de aceleración 1	c_1	1
Coeficiente de aceleración 2	c_2	2

Para optimizar la ampacidad del cable, limitamos las variables de diseño dentro de un rango específico, como se detalla en la [Tabla 3.4](#). También establecimos un límite superior

de \$300 para el costo de instalación (C_1). Es importante mencionar que colocar costos superiores a 300 no implica una variación lineal en la ampacidad. Los parámetros ρ_r , ρ_s y θ_{amb} se mantuvieron constantes, según se indica en la [Tabla 3.2](#), y los valores correspondientes se obtuvieron de [18]. Posteriormente, abordamos el problema de optimización formulado en la ecuación (3.7) utilizando los métodos de GA y PSO.

En el desarrollo de la optimización, implementamos un código de algoritmo en MATLAB que incorpora mejoras significativas. Para el algoritmo GA, se introdujo un mecanismo de reinicialización en caso de quedar atrapados en óptimos locales, aumentando así la tasa de éxito en la obtención de soluciones óptimas globales. Por otro lado, para el algoritmo PSO, utilizamos una función de aptitud de penalización auto-adaptativa, lo que facilitó una alta tasa de convergencia rápida. Los parámetros específicos para cada algoritmo propuesto se detallan en la [Tabla 3.5](#). Es relevante destacar que las pruebas y comparaciones del rendimiento de los algoritmos GA y PSO se llevaron a cabo en un procesador Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz, 2.21 GHz, con 12.00 GB de RAM. Estas condiciones de hardware proporcionaron un entorno de pruebas estándar y confiable para evaluar el desempeño de los algoritmos.

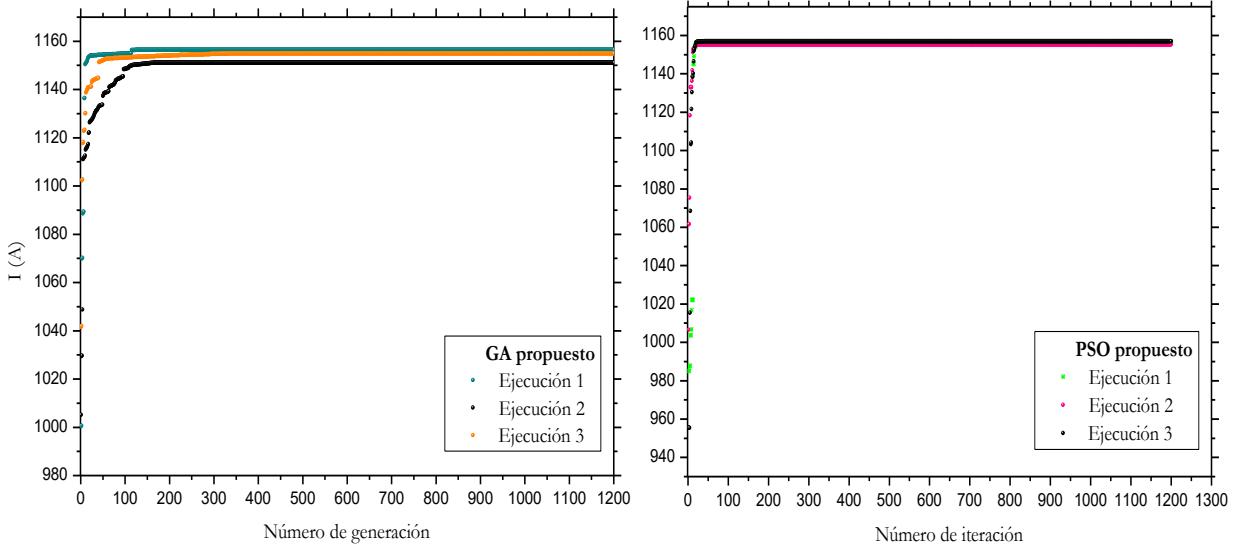


Figura 3.7. a) Convergencia del GA. b) Convergencia del PSO.

Como resultado del proceso de optimización, se obtuvo la [Figura 3.7](#), que muestra las gráficas de convergencia durante el proceso. En estas gráficas, podemos apreciar cómo la función objetivo evoluciona en cada generación para el GA y en cada iteración para el algoritmo PSO a medida que buscan la solución óptima. La curva de convergencia refleja cómo la función objetivo se estabiliza y se acerca gradualmente al valor óptimo a lo largo de

las generaciones o iteraciones. Este comportamiento constante hacia el máximo demuestra la capacidad efectiva de los algoritmos propuestos para alcanzar una solución óptima y superar óptimos locales en la búsqueda de la solución global. Es importante destacar que las dispersiones presentes en los resultados de cada ejecución son inherentes a los algoritmos y forman parte de su naturaleza estocástica.

Al comparar la convergencia de los algoritmos propuestos, se observa que PSO converge más rápido que GA, alcanzando una solución óptima en un menor tiempo. Para alrededor de 70 iteraciones, el algoritmo PSO se estabiliza, mientras que para GA, la convergencia se da alrededor de las 300 generaciones. Este hecho demuestra la eficiencia y rapidez de PSO en encontrar soluciones óptimas en comparación con GA. Esto significa que el algoritmo PSO se estabiliza aproximadamente en un 23.33% del tiempo que le toma al algoritmo GA converger a una solución óptima.

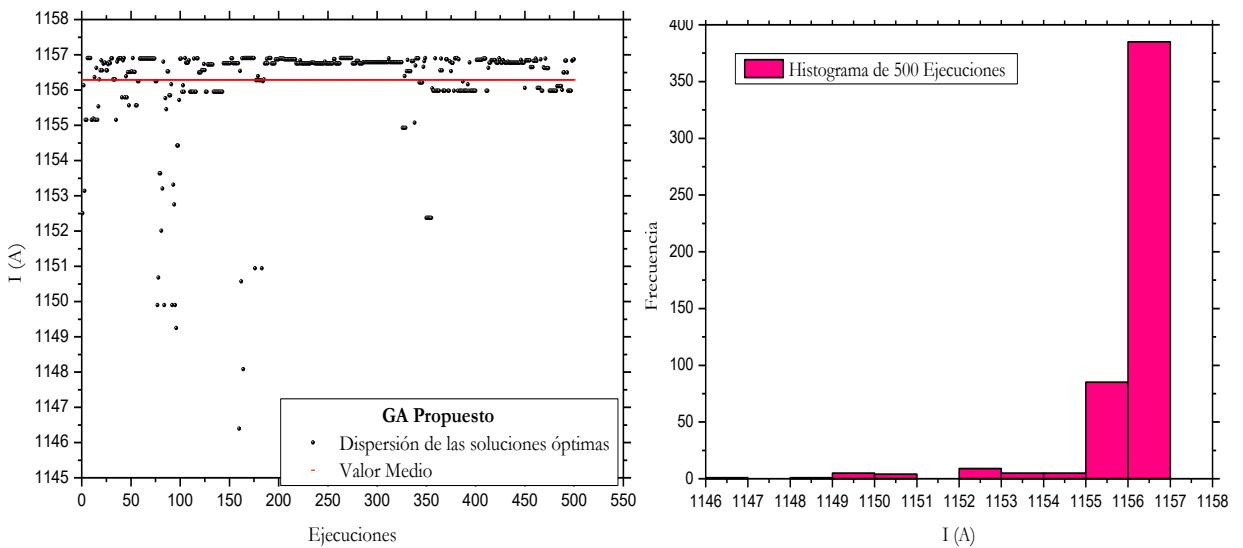


Figura 3.8. a) Resultados óptimos por GA propuesto. **b)** Histograma.

Para evaluar el rendimiento de los algoritmos propuestos, se realizó una comparación con el solucionador GA tradicional de MATLAB, ampliamente utilizado en la investigación científica. El GA tradicional es similar al propuesto, pero carece del procedimiento de reinicio y la transferencia de cromosomas élite. Esta configuración se empleó para verificar la efectividad del GA propuesto. Es relevante destacar que el GA tradicional es un algoritmo estocástico y, como tal, sus resultados pueden variar en cada ejecución, al igual que los algoritmos propuestos. Con el fin de obtener resultados más precisos, se realizó un análisis para 500 ejecuciones tanto para los algoritmos propuestos como para el GA tradicional.

Los resultados de rendimiento de los algoritmos propuestos y el GA tradicional, se presentan en la [Tabla 4](#). En la [Figura 3.8 a](#) muestra la gráfica de dispersión de los resultados óptimos de la ampacidad del cable en cada ejecución. Esta figura revela una mayor concentración de puntos que se aproximan al valor máximo. Asimismo, para una visualización más clara, en la [Figura 3.8 b](#) se presenta un histograma que destaca que el valor máximo ocurre con mayor frecuencia en el rango de 1156 a 1157 A, con una probabilidad de éxito del 77.4% (= frecuencia entre el número total de ejecuciones). Por otro lado, los resultados del GA tradicional se muestran en la [Figura 3.9 a](#) y [Figura 3.9 b](#), donde se observa una mayor dispersión de los valores óptimos de la ampacidad para cada ejecución en comparación con el GA propuesto. El histograma también muestra que la probabilidad de éxito para determinar el valor de ampacidad de la barra más grande es del 41.6%. En cuanto a los tiempos de ejecución, el GA propuesto supera al GA tradicional en un 34 %, lo que demuestra una mejora significativa en la eficiencia del algoritmo propuesto.

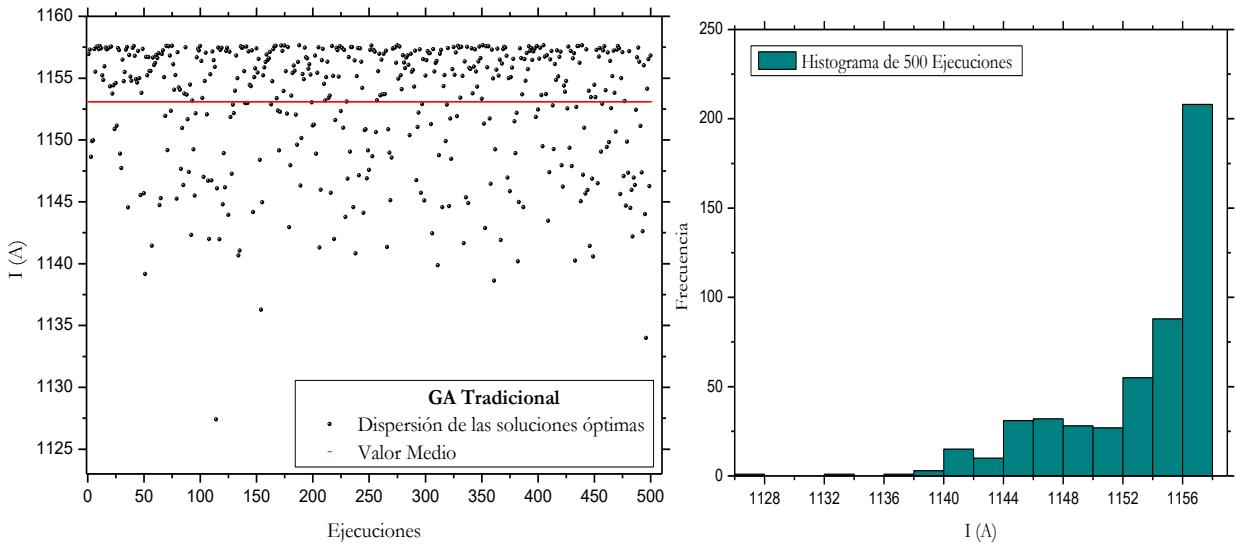


Figura 3.9. a) Resultados óptimos por GA tradicional. **b)** Histograma de Ampacidad.

En relación al algoritmo PSO, se han identificado ciertas limitaciones, como su alta variabilidad, como se muestra en la [Figura 3.10](#), y una baja probabilidad de éxito en algunas instancias, según se observa en la [Tabla 4](#). Para superar las limitaciones y mejorar el rendimiento del algoritmo, se introdujeron dos mejoras clave que han producido resultados notables: el "Reinicio Adaptativo con Inercia Aleatoria" (ARI) y la "Búsqueda Local".

La técnica de ARI ha sido fundamental para mejorar el algoritmo. Esta mejora combina la capacidad de reiniciar las partículas con la introducción de una probabilidad de inercia

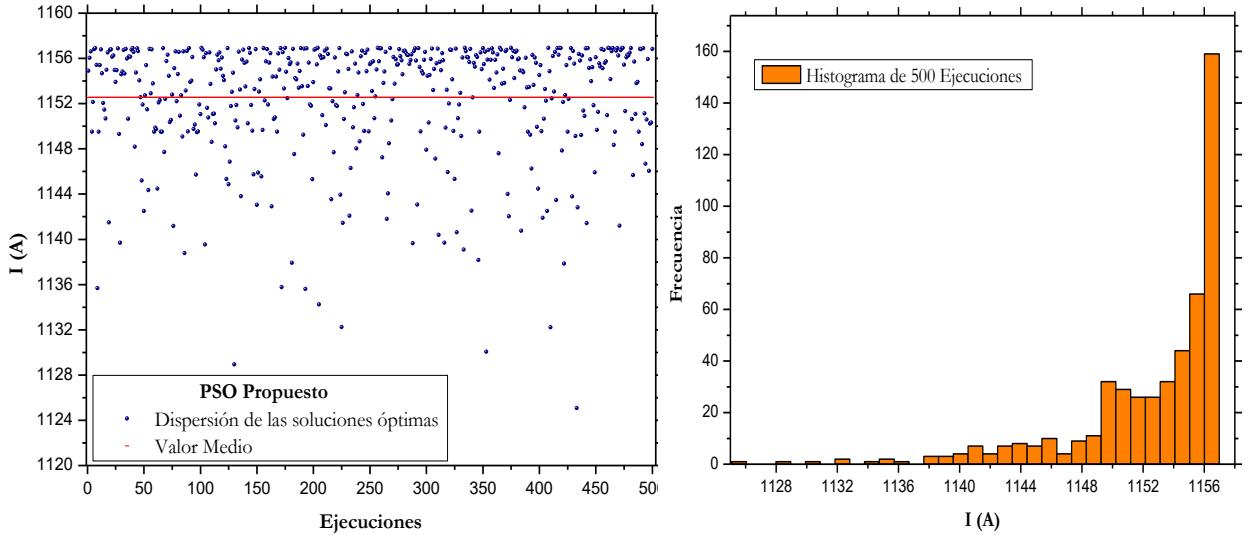


Figura 3.10. a) Resultados óptimos por PSO. b) Histograma de Ampacidad.

aleatoria durante la ejecución. El Reinicio Adaptativo permite restablecer la posición y velocidad de una partícula si su desempeño no mejora después de un cierto número de iteraciones. En esta implementación, verificamos si se debe realizar el ARI antes de actualizar la velocidad de las partículas, y establecimos una probabilidad de ARI del 0.1 (este valor puede ajustarse según las necesidades del problema). La incorporación de inercia aleatoria ha permitido explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda, reduciendo las fluctuaciones y mejorando la convergencia del algoritmo. Además, introdujimos la “Búsqueda Local” para afinar las soluciones cercanas a los óptimos encontrados por las partículas. Esta técnica ha demostrado ser especialmente efectiva para mejorar áreas prometedoras del espacio de búsqueda, lo que ha resultado en un aumento significativo en la precisión y convergencia del algoritmo. Como resultado, hemos obtenido soluciones más estables y confiables en múltiples ejecuciones, como se muestra en la [Figura 3.11](#), donde las soluciones de la ampacidad en múltiples ejecuciones se encuentran en un rango más estrecho en comparación con GA, GA tradicional y PSO original. Si bien la tasa de éxito ha mejorado, alcanzando un valor del 55.4%, también hemos reducido la variabilidad. Es importante tener en cuenta que PSO es un algoritmo estocástico por naturaleza, lo que implica cierta variabilidad en los resultados. Sin embargo, nuestras mejoras de ARI y Búsqueda Local han demostrado ser altamente efectivas al aumentar la estabilidad y convergencia del algoritmo. En comparación con su forma original, nuestra implementación mejorada representa una ventaja considerable en términos de eficiencia y precisión.

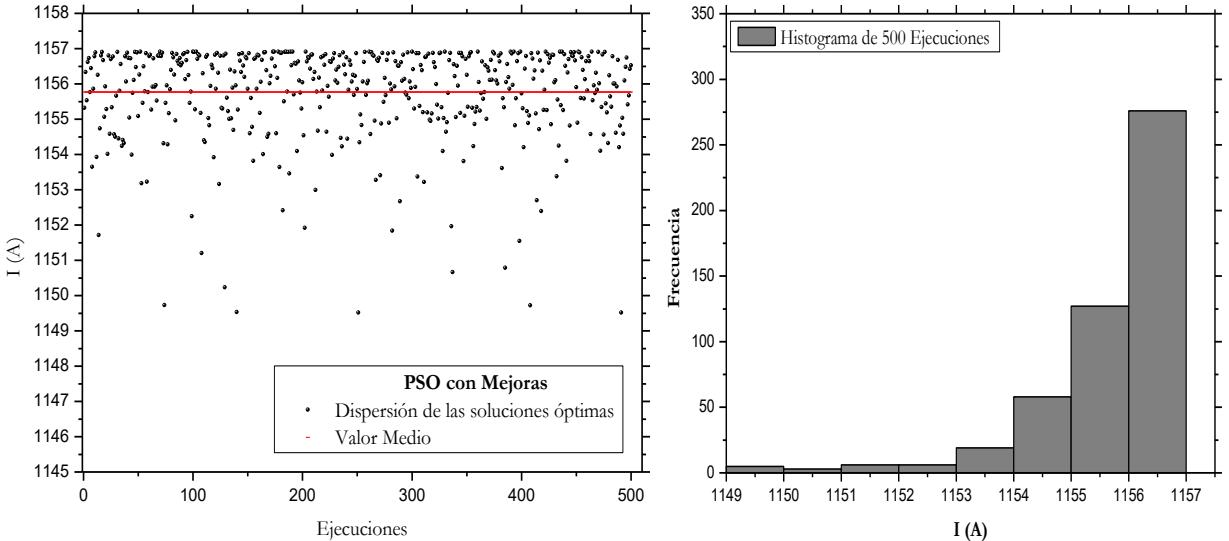


Figura 3.11. a) Resultados óptimos por PSO mejorado. b) Histograma de Ampacidad.

Los resultados del desempeño de cada algoritmo se exponen en la [Tabla 3.6](#), destacando el mejor valor de la ampacidad, el promedio, la desviación estándar y la probabilidad de éxito de la mejor solución. Al comparar los resultados entre los algoritmos propuestos y el GA tradicional de MATLAB, encontramos resultados prometedores en términos de precisión, rendimiento y consistencia para el GA con reinicio adaptativo y el PSO con función de penalización y la técnica ARI. En cuanto a precisión y consistencia, el GA propuesto exhibe un valor medio de 1156.3 A con una desviación estándar de 1.27, lo que indica que los resultados tienden a ser cercanos al valor medio obtenido. Asimismo, el PSO mejorado muestra una desviación similar de 1.31. En contraste, el GA tradicional de MATLAB tiene una desviación estándar de 5, sugiriendo una mayor variabilidad en los resultados en cada ejecución. Además, el valor máximo de ampacidad alcanzado por los algoritmos propuestos es de 1156.9 A, mientras que el GA tradicional de MATLAB logra un valor máximo de 1157.6 A. Aunque el valor máximo del GA tradicional es ligeramente superior, su desviación estándar es significativamente mayor, y la probabilidad de éxito es menor en comparación con los algoritmos propuestos. Además, el valor medio de ampacidad del algoritmo propuesto es aproximadamente un 26.8% superior al del GA tradicional.

Estos resultados respaldan la solidez del algoritmo propuesto al ofrecer soluciones más estables y consistentes, posicionándolo como una opción altamente confiable y prometedora para la optimización del problema planteado en nuestro estudio. Tanto el algoritmo GA como el algoritmo PSO mejorado demuestran ser eficientes y confiables en la optimización

Tabla 3.6. Análisis de Desempeño de los Algoritmos.

	Algoritmos Propuestos			
Rendimiento	AG	PSO	PSO mejorado	AG Trad.
Mejor solución	1156.91	1156.915	1156.915	1157.65
Valor medio	1156.29	1152.5633	1155.773	1153.14
Desv. std.	1.27	5.1984	1.3111	5.00
Probabilidad	77.4%	30.22%	55.4%	41.6%

del problema considerado, pero es importante destacar que PSO tiene una ventaja significativa en términos de su implementación sencilla en comparación con GA. La simplicidad de PSO facilita su comprensión y aplicación, lo que puede ser beneficioso para aquellos que buscan una solución rápida y directa al problema. Por otro lado, GA requiere ajustar varios operadores para obtener un buen rendimiento, lo que puede ser más complejo.

Asimismo, el uso de una función de penalización en PSO puede ser más sencillo que implementar restricciones en GA. En este sentido, PSO con función de penalización auto-adaptativa y la implementación ARI han demostrado ser altamente efectivos. Basándonos en el análisis anterior, para la instalación de cables en relleno y sin relleno, hemos utilizado el algoritmo propuesto GA, el cual es más efectivo y confiable en términos de probabilidad de éxito en comparación con PSO mejorado, y hemos encontrado resultados notables que se presentan en la [Tabla 3.7](#).

Tabla 3.7. Resultado de la optimización.

Variable (m)	Valores con relleno	Valores sin relleno
L (m)	0.500	0.50
L_G (m)	0.872	...
w (m)	3.561	4.00
h (m)	1.345	...
s (m)	1.480	1.70
Costo total (\$/m ³)	300	63.801
Costo de relleno (\$/m ³)	135	...
Ampacidad (A)	1156.91	959.71
W_d (W/m)	3 * 3.546	3 * 3.546
W_T (W/m)	3 * 68.33	3 * 48.09
λ_1	2.670	2.664

Inicialmente, al considerar las restricciones de la [Tabla 3.8](#) y sin tomar en cuenta el relleno térmico, la ampacidad óptima del cable se calculó en 959.7 A. Esto implicaría la necesidad

de utilizar un conductor con una mayor área transversal para soportar una corriente de carga de 1000 A. Sin embargo, al aplicar la optimización de la ampacidad considerando la configuración de relleno térmico, la ampacidad del cable aumenta significativamente a 1156.9 A, lo que lo hace adecuado para una corriente de carga de 1000 A. Por tanto, el aumento porcentual en la ampacidad del cable instalado con relleno, en comparación con el cable sin relleno, es de aproximadamente 20.55%. Este incremento representa una mejora considerable en la ampacidad del cable, lo que permite aprovechar al máximo la infraestructura existente sin la necesidad de recurrir a conductores de mayor capacidad.

Al implementar el relleno térmico, se ha evaluado cuidadosamente su efecto en las pérdidas totales (W_T) del conductor bajo las mismas condiciones, tanto con relleno como sin relleno, para una temperatura máxima del conductor de 90 °C. Sin relleno térmico, las pérdidas totales son aproximadamente de 48.1 W/m, mientras que con relleno térmico, aumentan a 68.33 W/m, lo que representa un aumento del 2.5% en términos porcentuales. Es importante destacar que este incremento en las pérdidas era esperado, debido a que el relleno térmico añade resistencia adicional al conductor, resultando en una mayor disipación de calor y, por ende, en un aumento en las pérdidas. Al evaluar la implementación del relleno térmico, se debe considerar este aumento en las pérdidas totales, ya que podría afectar la eficiencia del sistema y tener un impacto en los costos operativos. En consecuencia, se vuelve crucial buscar un equilibrio entre la mejora en la ampacidad y el aumento en las pérdidas, con el objetivo de obtener la solución óptima que satisface tanto los requisitos técnicos como económicos del proyecto.

Tabla 3.8. Límites de las variables de diseño.

Límite inferior (m)	Variable	Límite superior (m)
0.5	L	2
$D_e \approx 0.147$	s	2
1.2	$w = 2 \cdot 0.5 + 2D_e + 2s$	4
...	$C = 30 \cdot (2 \cdot 0.5 + 2D_e + 2s) \cdot \left(L + \frac{D_e}{2}\right)$	300

Al maximizar la ampacidad del cable I , se observa que el efecto de proximidad influye en el aumento de la separación entre cables s , mientras que, para un ancho de relleno w dado, las pérdidas de corriente circulante tienden a disminuir debido a la mejora en la disipación y reducción de la resistencia eléctrica proporcionada por el relleno térmico. El valor óptimo de s que maximiza la ampacidad se alcanza cuando ambos efectos se equilibran adecuadamente.

En la [Figura 3.12](#), se muestra la ampacidad del cable en función de s , y se puede apreciar que alcanza su valor máximo en $s = 2.3$ m. Para valores inferiores a 2.3 m, la ampacidad del cable disminuye debido al efecto de proximidad, mientras que para valores superiores a 2.3 m, disminuye debido al aumento de la resistividad térmica efectiva entre los cables y el entorno.

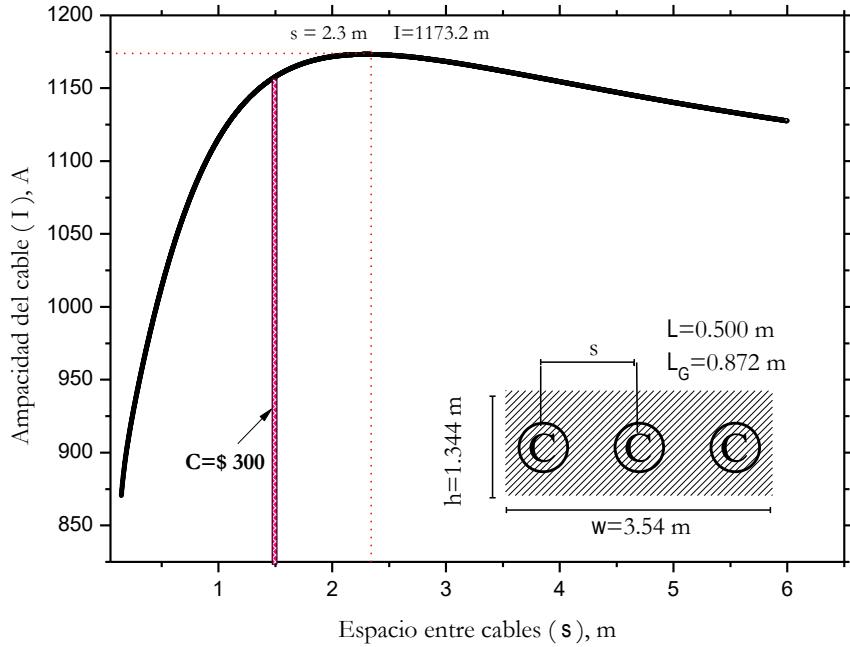


Figura 3.12. Efecto de la separación de cables sobre la ampacidad del cable.

El aumento del volumen de relleno tiene un impacto directo en el costo total de instalación y afecta significativamente la ampacidad del cable, como se muestra en la [Tabla 3.7](#). A medida que el volumen de relleno aumenta, la ampacidad del cable se ve afectada, lo que puede ser beneficioso para transportar corriente de manera eficiente. Sin embargo, en la [Figura 3.12](#) se evidencia que al incrementar s , la ampacidad se incrementa hasta alcanzar un valor máximo de 1173.2 A, pero luego disminuye, es decir, un mayor ancho de relleno no siempre se traduce en una mayor ampacidad, y el costo asociado también aumenta. En nuestro estudio, se ha asignado una restricción de costo de instalación de 300 de manera arbitraria, cuyos resultados se muestran en la [Tabla 3.7](#). Es importante destacar que si el diseñador considera necesario cambiar este valor, no hay problema, ya que es ajustable según las necesidades específicas del proyecto.

En caso de requerirse una ampacidad que supere la corriente de carga, es fundamental agregar una restricción en forma de $I > I_{carga}$, la cual debe adaptarse al diseño particular. Esto asegurará que el sistema pueda manejar la corriente sin sobrecargarse. Nuestro enfoque

propuesto sugiere posponer o evitar inversiones en cables de sección más alta para líneas subterráneas, y en su lugar, centrarse en el uso de materiales de relleno térmico para lograr una ampacidad óptima a un costo más favorable. Además, en aquellos lugares donde los cables ya están sobrecargados, se podría considerar la adición de relleno térmico en lugar de instalar cables con una sección transversal más grande.

Es importante destacar que la optimización se llevó a cabo considerando valores constantes de ρ_r , ρ_s y θ_{amb} . No obstante, es crucial tener en cuenta que la ampacidad del cable puede verse afectada por fluctuaciones climáticas y geográficas. Por ejemplo, al modificar únicamente la resistividad térmica del material de relleno (ρ_r) a 0.6 K.m/W, la ampacidad se reduce a 1145.1 A. De manera similar, al restablecer y modificar únicamente el valor de ρ_s a 2.6 K.m/W, la ampacidad disminuye a 1138.8 A. Además, cuando la temperatura ambiente disminuye a 20 °C, la ampacidad se incrementó significativamente a 1202.8 A. Estos factores tienen una influencia significativa tanto en la ampacidad del cable como en las dimensiones del material de relleno, lo que resalta la necesidad de considerar un enfoque de optimización probabilística. La variabilidad de estos factores subraya la importancia de aplicar una metodología que considere diferentes escenarios climáticos y geográficos en el proceso de optimización. Un enfoque probabilístico permitiría abordar incertidumbres y variaciones en los parámetros relevantes, asegurando soluciones más robustas y adaptables a diversas condiciones.

Al adoptar el diseño de instalación propuesto, ilustrado en la [Figura 3.1](#), y la aplicación de los algoritmos propuestos, es factible posponer o evitar inversiones en cables de mayor sección para líneas subterráneas. En lugar de ello, se enfoca en el uso de materiales de relleno térmico para lograr una ampacidad óptima a un costo más favorable. Esta estrategia representa una solución eficiente y económica para garantizar el rendimiento óptimo del sistema. Además, en situaciones donde los cables ya están sobrecargados, la adición de relleno térmico podría considerarse como una alternativa viable en lugar de instalar cables de mayor sección. Es relevante destacar que el método propuesto puede ser aplicado en nuevos sistemas, permitiendo dimensionar los componentes del cable y el relleno térmico. No obstante, en este estudio no se ha abordado este aspecto específico.

3.5.5 Conclusiones I

En este estudio, se han presentado dos algoritmos implementados en MATLAB: El "GA con Reinicio Adaptativo" y el "PSO con Reinicio Adaptativo-Inercia Aleatoria y Búsqueda Local". Ambos algoritmos fueron utilizados para optimizar la ampacidad del cable de 220 kV instalado en relleno térmico, considerando restricciones físicas y económicas. Los resultados obtenidos de manera consistente muestran que los algoritmos propuestos logran encontrar el valor óptimo de la ampacidad del cable, a diferencia del algoritmo genético tradicional, que exhibe mayor variabilidad en los resultados. Nuestro enfoque ofrece resultados más precisos y consistentes, con una probabilidad de éxito del 77.4% para el GA propuesto y del 55.4% para el PSO propuesto, en comparación con el 41.6% del enfoque tradicional. Además, el rendimiento del algoritmo propuesto es un 34% más rápido en términos de tiempo de ejecución que el algoritmo tradicional.

Se logró una ampacidad óptima de 1156.9 A para el cable con relleno térmico, con dimensiones de instalación específicas y un costo total de instalación de \$135/m³. El uso del relleno térmico ha incrementado la ampacidad del cable en aproximadamente un 20.55% en comparación con el cable sin relleno térmico. Este resultado resalta la efectividad y ventaja de implementar el relleno térmico como una estrategia para mejorar significativamente la ampacidad del cable. Es esencial considerar la sensibilidad de la ampacidad del cable ante variaciones en los parámetros del suelo, relleno y temperatura ambiente. Por tanto, abordar estas incertidumbres mediante un enfoque probabilístico es crucial para garantizar soluciones más robustas y adaptables a diversas condiciones.

Nuestra propuesta tiene aplicaciones prácticas tanto en el diseño de nuevos sistemas de cables subterráneos como en la mejora de sistemas existentes. La implementación de relleno térmico ofrece una opción más rentable en comparación con la inversión en cables de mayor área transversal. Nuestros enfoques innovadores en la optimización de cables subterráneos contribuyen significativamente al campo, mejorando la eficiencia y confiabilidad de las redes eléctricas. Estos algoritmos propuestos, como GA y PSO, son especialmente valiosos para ingenieros y diseñadores que trabajan en la infraestructura eléctrica. Estos algoritmos han demostrado un destacado rendimiento al obtener soluciones óptimas globales y ofrecen ventajas en eficiencia y efectividad. A diferencia de los métodos tradicionales, los algoritmos GA y PSO están diseñados específicamente para abordar problemas complejos y no lineales, brindando una exploración exhaustiva del espacio de soluciones y adaptabilidad

en su implementación.

Para futuros trabajos, se evaluará la optimización simultánea del costo y la ampacidad del cable mediante un enfoque probabilístico, lo que proporcionará una visión más detallada y completa para la toma de decisiones en el diseño y mantenimiento de sistemas de cableado subterráneo. Además, se buscará mejorar aún más la probabilidad de éxito reduciendo la variabilidad de los algoritmos propuestos. Esta perspectiva enriquecerá aún más la propuesta y contribuirá al avance en la optimización de sistemas eléctricos.

3.6 Optimización Biobjetivo

En el proceso de cálculo de la ampacidad de cables subterráneos, se debe tener en cuenta la consideración simultánea de múltiples objetivos en lugar de enfocarse únicamente en uno, como la ampacidad. Sin embargo, en la literatura, existe una escasez de revisiones exhaustivas sobre métodos de optimización multiobjetivo y sus aplicaciones específicas en el campo de la ampacidad de cables subterráneos.

Por ejemplo, Perović et al. [19, 39] determinaron los valores óptimos para las dimensiones de la zanja, el relleno térmico y la ampacidad de los cables utilizando un problema de optimización no lineal con restricciones. Emplearon el algoritmo de búsqueda gravitacional, el algoritmo de recocido simulado y el algoritmo de búsqueda de patrón generalizado para resolver el problema. En otro estudio, Zarchi y Vahidi [45] propusieron el método de optimización multiobjetivo de enjambre de partículas autoadaptable mejorado (MOISAPSO) para calcular la configuración óptima de los cables subterráneos en el banco de ductos de concreto, maximizando la ampacidad y minimizando el costo del sistema. En referencia [18], se presenta un algoritmo basado en el método de optimización heurística (ICA) y el enfoque probabilístico (Monte Carlo) para calcular la mejor ampacidad del cable, considerando aspectos económicos y la incertidumbre de los parámetros afectados. Además, Ocłoń et al. [47] presentaron los algoritmos PSO, Jaya y MJaya para la optimización Biobjetivo en el diseño de un sistema de cable que minimiza los costos de relleno y maximiza la corriente eléctrica permitida a través de los cables. Wang et al. [46] estudiaron la metodología de colocación óptima del cable de potencia en un banco de ductos y resolvieron la función de optimización multiobjetivo mediante el algoritmo NSGA-III.

El Método de Suma Ponderada (MSP) se destaca como una herramienta ampliamente

utilizada en la optimización multiobjetivo, permitiendo combinar eficazmente múltiples objetivos en un solo valor ponderado. Esta flexibilidad brinda la posibilidad de asignar pesos o importancias diferentes a cada función objetivo, adaptándose a las necesidades específicas del problema en cuestión [45, 106, 112, 162]. Sin embargo, uno de los aspectos poco explorados en la literatura es la obtención del frente de Pareto al variar los pesos, especialmente en el contexto de cables subterráneos, donde se busca optimizar tanto la ampacidad como el costo de instalación del cable.

En este contexto, la investigación se centra en la implementación y aplicación de dos algoritmos de optimización multiobjetivo: FMinCon, conocido por su eficacia en la resolución de problemas complejos con restricciones utilizando MATLAB, y PSO con "Reinicio Adaptativo con Inercia Aleatoria". Este último algoritmo, desarrollado previamente, se integra con MSP, presentando una perspectiva innovadora para abordar la optimización multiobjetivo, especialmente en el contexto de la optimización de cables subterráneos.

Para evaluar y comparar el rendimiento de los algoritmos propuestos, se utilizará la función `gamultiobj` disponible en MATLAB. Esta evaluación permitirá analizar y determinar cuál de estos enfoques es más adecuado para optimizar la ampacidad y el costo de instalación del cable subterráneo, brindando una valiosa contribución al campo de la ingeniería eléctrica y a la toma de decisiones en la planificación de redes de distribución subterráneas.

Para iniciar, se formula el problema de optimización biobjetivo con suma ponderada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & F(\mathbf{x}) = w_1 \cdot f_1(\mathbf{x}) + (1 - w_1) \cdot f_2(\mathbf{x}) \\
 \text{s.t.} \quad & h \leq w, \\
 & s_1 = \frac{w}{2} - s \geq 0.3, \\
 & h_1 = L_G - \frac{h}{2} \geq 0.2, \\
 & h_2 = L - L_G + \frac{h}{2} - \frac{D_e}{2} \geq 0.3, \\
 & h_3 = -L + L_G + \frac{h}{2} - \frac{D_e}{2} \geq 0.3, \\
 & 1.3 \leq h_1 + h_2 + h_3 + D_e = L_G + \frac{h}{2} \leq 3,
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

La función compuesta $F(\mathbf{x})$ representa la combinación ponderada de dos funciones objetivo: la ampacidad del cable f_1 y el costo total f_2 , y el objetivo es minimizar esta función. Es

importante tener en cuenta que se busca maximizar la ampacidad y minimizar el costo. En la formulación del problema descrita en la ecuación (3.9), se han ajustado las restricciones y se ha mejorado la ecuación (3.7), sin modificar los límites de las variables \mathbf{x} establecidos en la Tabla 3.4.

3.6.1 Algoritmo FMinCon y Método de Suma Ponderada

La función FMinCon en MATLAB es un algoritmo de optimización utilizado para resolver problemas no lineales con restricciones. Se basa en métodos de programación no lineal para encontrar el mínimo de una función objetivo sujeta a restricciones lineales y no lineales [163]. Sin embargo, es importante destacar que FMinCon es un algoritmo de optimización de un solo objetivo y no está específicamente diseñado para la optimización multiobjetivo.

Algorithm 3 Pseudocódigo para FMinCon - MSP

- 1: Define las funciones objetivo $f_1(\mathbf{x})$ y $f_2(\mathbf{x})$, y las restricciones $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$.
 - 2: Define los pesos de las variables w_1 y w_2 en el rango de 0 a 1, y asegúrate de que la suma de los pesos sea igual a 1.
 - 3: Establece los límites inferior y superior para cada variable de diseño x_1, x_2, \dots, x_m .
 - 4: Configura los parámetros de FMinCon.
 - 5: Normaliza las funciones objetivo y denominar como $F_{1_{norm}}(\mathbf{x})$ y $F_{2_{norm}}(\mathbf{x})$.
 - 6: Define la función de suma ponderada que combina las funciones objetivo normalizadas:

$$F(\mathbf{x}) = w_1 F_{1_{norm}}(\mathbf{x}) + w_2 F_{2_{norm}}(\mathbf{x}).$$
 - 7: Define la función de restricción lineal: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$.
 - 8: Define la función de restricción no lineal: $nonlcon(\mathbf{x}) \leq 0$.
 - 9: Utiliza la función de MATLAB que representa la función objetivo global:

$$\text{fmincon}(fun, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, nonlcon, options)$$
, donde fun es la función objetivo global, x_0 es el vector inicial de variables de diseño, A y b son matrices que definen las restricciones lineales, A_{eq} y b_{eq} son matrices que definen las restricciones de igualdad lineales, lb y ub son los límites inferior y superior para cada variable de diseño y $options$ son los parámetros de fmincon.
 - 10: Itera a través de los diferentes pesos w_1 en un bucle for.
 - 11: En cada iteración, ejecuta la función FMinCon para encontrar la solución óptima.
 - 12: Verifica que la solución encontrada cumpla con las restricciones del problema.
 - 13: Si la solución no cumple con las restricciones, vuelve al paso 9 y ajusta los parámetros de fmincon hasta encontrar una solución que cumpla con las restricciones.
 - 14: Calcula los valores de las funciones objetivo y presenta la solución óptima encontrada.
 - 15: Almacena los resultados de cada iteración.
 - 16: Traza un gráfico del frente de Pareto utilizando los valores almacenados.
-

Para abordar problemas de optimización Biobjetivo con restricciones, se propone un enfoque innovador que integra la función incorporada FMinCon con el Método de la Suma Ponderada, al que denominamos FMinCon-MSP. Este enfoque ha sido implementado en

MATLAB y se ha diseñado un [Pseudocódigo 3](#) para guiar su ejecución. La [Figura 3.13](#) muestra el diagrama de flujo del algoritmo propuesto. El proceso comienza variando los pesos desde cero hasta uno en cada ejecución. Mediante la combinación ponderada de los objetivos, se busca encontrar el valor mínimo de la función objetivo en cada caso. Al explorar diversas combinaciones de pesos, se generan múltiples soluciones que conforman el frente de Pareto.

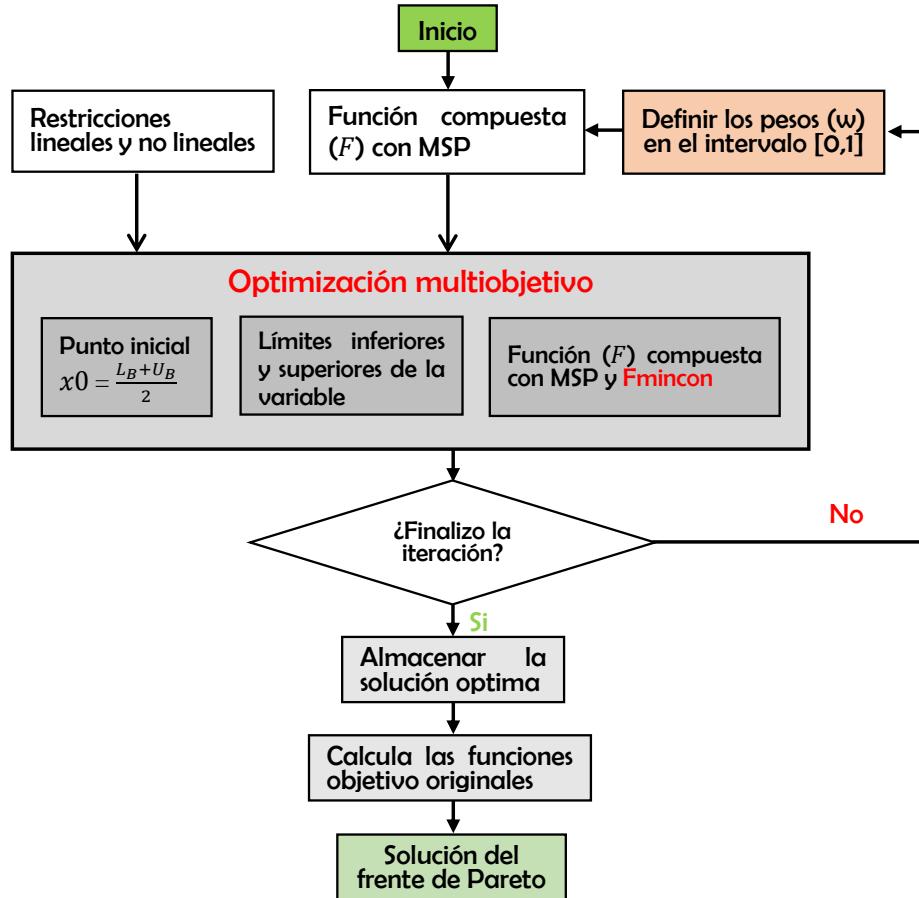


Figura 3.13. Diagrama de flujo de la técnica FMinCon-MSP.

3.6.2 Algoritmo PSO y Método de Suma Ponderada

El algoritmo PSO, con función de penalización y mejoras como el Reinicio Adaptativo con Inercia Aleatoria (ajustable a una probabilidad del 0.05 para reducir la variabilidad en cada ejecución), ha demostrado eficacia y facilidad de implementación, como se discute en la sección 3.6.4. En esta sección, se aprovecha la implementación previa para combinarla con el Método de Suma Ponderada (MSP), dando lugar al enfoque denominado PSO-MSP.

La función objetivo original, ya sea la ampacidad o el costo de instalación, refleja el objetivo principal de maximizar o minimizar. Para lograrlo, se emplea la función de penalización, introduciendo en esta sección la función de penalización estática lineal. Esta penalización se incorpora mediante el cálculo del término *penalty*. Inicialmente, el término de penalización se establece en cero y se incrementa proporcionalmente al incumplimiento de las restricciones. En cada iteración del algoritmo, la penalización se acumula a medida que se violan las restricciones y se actualiza según la ecuación:

$$\text{penalty} = \text{penalty} + k \cdot \text{Con}(i) \quad (\text{Incumplimiento de restricciones})$$

La penalización se aplica a través de un coeficiente k , que se multiplica por el valor de incumplimiento de cada restricción. Este coeficiente debe ser determinado experimentalmente para lograr un equilibrio entre penalizar soluciones inválidas y explorar el espacio de búsqueda. Se recomienda probar diferentes valores de k e evaluar los resultados, empezando con valores más bajos como $k = 10$ o $k = 100$, para verificar mejoras en el cumplimiento de las restricciones. En caso de persistir violaciones, se puede reducir gradualmente el valor de k . No obstante, se debe tener precaución para no restringir excesivamente la exploración del espacio de búsqueda. En este estudio, se realizaron varios intentos para encontrar un equilibrio adecuado, y se determinó que un valor de $k = 10^6$ fue el más apropiado. Es importante destacar que cada problema es único y puede requerir ajustes personalizados en el valor de k .

Para identificar restricciones no cumplidas, se utiliza la condición $\text{Con}(i) > 0$. De esta manera, solo se penalizan las restricciones que no se cumplen. La variable Con representa todas las restricciones en forma de $g(x) \leq 0$. Al utilizar la condición $\text{Con}(i) > 0$, se determina si una restricción específica no se cumple, y en ese caso se aplica la penalización correspondiente en el cálculo de la función objetivo.

La función objetivo penalizada, denotada como $F(x)$, se obtiene al restar el término de penalización *penalty* de la función objetivo original. En el contexto del objetivo penalizado con el método de suma ponderada, se busca determinar una penalización adecuada para su implementación. Para lograr esto, se definen dos funciones:

$$\begin{aligned} F_{1\text{pen}} &= F_1 - k \cdot \text{penalty}, \\ F_{2\text{pen}} &= -F_2 - k \cdot \text{penalty}, \end{aligned} \tag{3.10}$$

donde $F_{1\text{pen}}$ y $F_{2\text{pen}}$ representan la función penalizada de la ampacidad del cable y el costo

de instalación, respectivamente.

El MSP, definido en la ecuación (3.9), utiliza w_1 como el peso asignado a F_1 , y $(1 - w_1)$ como el peso asignado a F_2 . Si el objetivo es minimizar la función, se puede multiplicar el resultado por -1. Tomando en cuenta las funciones de penalización F_1 y F_2 , la función compuesta se expresa como:

$$F = w_1 \cdot F_1 - (1 - w_1) \cdot F_2 - k \cdot \text{penalty} \quad (3.11)$$

Al utilizar esta implementación y el código PSO propuesto, se obtendrán valores óptimos para el objetivo original. Variando los valores de w_1 de cero a uno, se logra obtener el frente de Pareto, que permite un mejor entendimiento de las funciones objetivos. Este enfoque simultáneamente maximiza la ampacidad y minimiza el costo de instalación, al tiempo que considera las restricciones específicas y aplica la correspondiente penalización.

3.6.3 Algoritmo `gamultiobj`

Entre los numerosos algoritmos de optimización multiobjetivo, el GA, basado en el mecanismo biológico genético y evolutivo, es sin duda el más ampliamente utilizado y exitoso [164, 165]. Entre sus principales ventajas se encuentran la capacidad de manejar problemas no lineales y multimodales, la flexibilidad de modelado y la capacidad de proporcionar un conjunto diverso de soluciones óptimas [166]. Por esta razón, se ha utilizado con éxito en problemas de optimización complejos y está ampliamente disponible en la mayoría del software de optimización, incluido MATLAB. Debido a su facilidad de implementación, GA se ha utilizado ampliamente en la resolución de diversos problemas de ingeniería [167, 168, 169, 170].

En este trabajo, se utilizó la implementación del algoritmo `gamultiobj` en MATLAB, que es una variante del algoritmo genético de clasificación rápida elitista controlado (NSGA-II) para la optimización multiobjetivo [171]. El NSGA-II con estrategia de élite, propuesto por Kalyanmoy Deb, es un algoritmo genético multiobjetivo ampliamente utilizado para la optimización restringida [170, 171, 172, 173], y se simplifica como el algoritmo `gamultiobj` en MATLAB para facilitar su aplicación [174]. Basado en la función `gamultiobj` en MATLAB, el objetivo es encontrar el conjunto de soluciones de equilibrio, es decir, las soluciones óptimas de Pareto, logrando un compromiso entre dos funciones objetivo. Este algoritmo tiene un alto rendimiento en el campo de la optimización y se utilizará para validar los resultados de los algoritmos multiobjetivo propuestos.

Para resolver el problema de optimización biobjetivo, se formula el objetivo como un problema de optimización vectorial $F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]^T$, donde $\mathbf{x} = [L_G, L, w, h, s]^T$ son las variables de decisión, sujetas a las restricciones de la ecuación (3.9). Utilizamos la función `gamultiobj` de MATLAB para abordar este problema. En el [Pseudocódigo 4](#), se detallan los pasos generales. En primer lugar, se definen los objetivos, variables de decisión y restricciones del problema, además de establecer los parámetros del algoritmo. Posteriormente, se crea una población inicial y se asigna el valor 0 al número de generación (Gen). A continuación, se inicia un proceso iterativo diseñado para evolucionar la población hasta alcanzar el número máximo de generaciones (MaxGen) definido, momento en el cual se detiene la iteración. Como resultado final de este procedimiento, se obtienen los individuos óptimos de Pareto presentes en la población final.

Algorithm 4 Algoritmo `gamultiobj`

- 1: Inicializar población
 - 2: Evaluar población con función objetivo
 - 3: **while** No se cumpla criterio de parada **do**
 - 4: Seleccionar padres
 - 5: Generar descendencia
 - 6: Mutar descendencia
 - 7: Evaluar descendencia con función objetivo
 - 8: Combinar población actual y descendencia
 - 9: Seleccionar sobrevivientes
 - 10: **end while**
 - 11: **return** Conjunto de soluciones óptimas
-

3.6.4 Resultados y Discusión II

La propuesta presentada en este estudio se ha aplicado al sistema de cable ilustrado en la [Figura 3.1](#), basado en la construcción mostrada en la [Figura 3.2](#). El objetivo principal de este enfoque es maximizar la ampacidad del sistema de cable y minimizar su costo total de manera simultánea. Inicialmente, se empleó la técnica FMinCon-MSP, seguida de la técnica PSO - MSP, y finalmente se compará con la técnica del algoritmo genético multiobjetivo (`gamultiobj`) de la caja de herramientas de optimización de MATLAB.

En la [Tabla 3.1](#) se presentan los parámetros eléctricos y térmicos de los cables utilizados en este estudio. Durante la optimización, se mantuvo constante la resistividad térmica del relleno en condiciones normales, la resistividad térmica del suelo natural y la temperatura

ambiente, cuyos valores se detallan en la [Tabla 3.2](#).

Para investigar las interacciones entre el costo de instalación y la ampacidad del cable, se emplearon dos enfoques propuestos: FMinCon-MSP y PSO-MSP, para obtener la Frontera de Pareto. La [Figura 3.14](#) muestra los resultados obtenidos con FMinCon-MSP, que consisten en 100 puntos de Pareto representando soluciones con equilibrio óptimo entre costo mínimo y máxima ampacidad del cable. El frente de Pareto no es una solución única, sino una variedad de opciones que ofrecen diferentes compromisos entre costo y ampacidad. Para explorar más opciones en el frente de Pareto, se recomienda generar más puntos ponderados durante la optimización, permitiendo evaluar soluciones aún más eficientes.

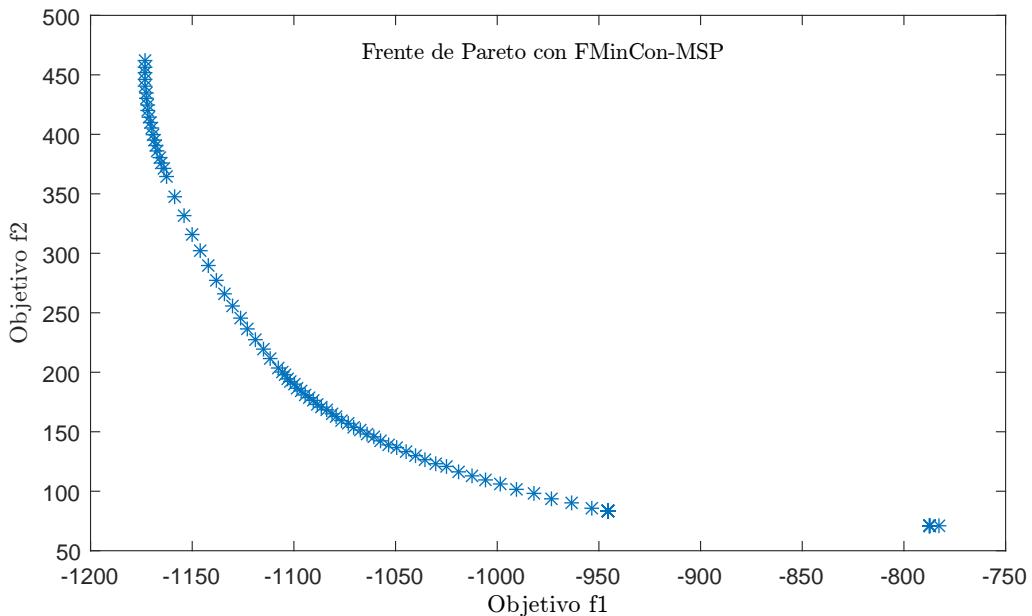


Figura 3.14. Frente de Pareto determinado por el enfoque FMinCon - MSP.

A medida que se incrementa el número de puntos de Pareto en la [Figura 3.15](#), el frente tiende a volverse más continuo, ofreciendo respuestas más confiables, aunque esto conlleva un mayor tiempo de ejecución. Por ejemplo, el tiempo de ejecución para 100 puntos fue de aproximadamente 2.0 segundos, mientras que para 600 y 1200 puntos fue de alrededor de 11.8 y 22.83 segundos, respectivamente. Es importante destacar que el algoritmo FMinCon es determinista por naturaleza y no estocástico, lo que implica que los frentes de Pareto se mantienen estables en cada ejecución y no cambian.

En la [Figura 3.16](#), se presentan los frentes de Pareto obtenidos mediante la técnica PSO-MSP. Las tres ejecuciones distintas bajo las mismas condiciones exhiben un comportamiento consistente y estable, con mínimas fluctuaciones. Aunque algunos puntos de Pareto varían

entre las diferentes ejecuciones, todos ellos siguen perteneciendo al mismo frente de Pareto. La naturaleza estocástica de PSO puede ocasionar fluctuaciones en puntos fuera del frente de Pareto, pero la mayoría de los puntos permanecen consistentes y cercanos al frente verdadero, lo que sugiere que PSO realiza una buena aproximación del frente óptimo. En la optimización multiobjetivo, el objetivo es obtener una buena aproximación del frente de Pareto y capturar la mayor cantidad posible de soluciones no dominadas.

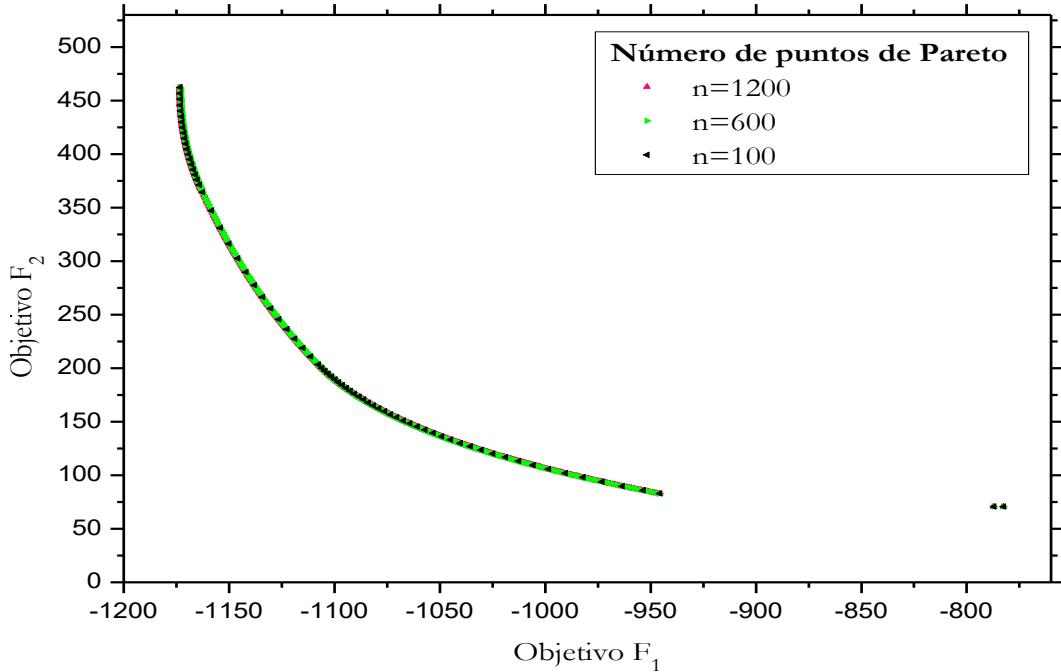


Figura 3.15. Frentes de Pareto para diferentes ejecuciones obtenidos con FMinCon-MSP.

El análisis comparativo entre los enfoques propuestos, FMinCon-MSP y PSO-MSP, revela notables discrepancias en la distribución de los puntos de Pareto. PSO-MSP demuestra una mayor capacidad de exploración en regiones donde FMinCon-MSP enfrenta limitaciones, como se observa en las Figuras 3.15 y 3.16. Estas diferencias se atribuyen a las características inherentes de cada algoritmo: PSO, con su naturaleza estocástica, logra una buena aproximación del frente óptimo, mientras que FMinCon, al ser un algoritmo local, converge rápidamente hacia óptimos locales pero puede tener dificultades para explorar regiones más amplias. Sin embargo, esta ventaja de PSO-MSP se ve contrarrestada por su rendimiento temporal. Por ejemplo, al obtener 100 puntos de Pareto, PSO-MSP requirió 305.77 segundos, mientras que FMinCon-MSP logró obtener en tan solo 2 segundos. Esto destaca la superioridad temporal de FMinCon-MSP, aproximadamente un 99.34% más rápido en comparación con PSO-MSP. Resultados similares se obtuvieron al considerar 600 y 1200 puntos

de Pareto.

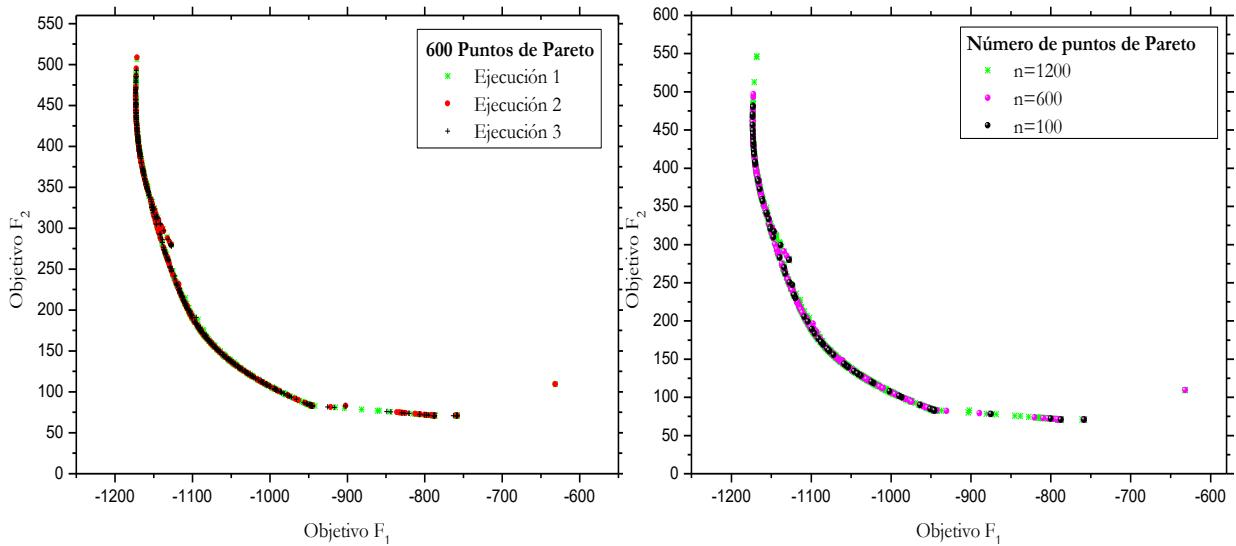


Figura 3.16. Frentes de Pareto Generado con PSO-MSP **a)** 600. **b)** 100, 600 y 1200.

Los frentes de Pareto presentados en las Figuras 3.15 y 3.16 constituyen un logro significativo en nuestra investigación. Sin embargo, es crucial señalar que los puntos de Pareto resultantes pueden mostrar superposiciones o agrupamientos en regiones específicas del espacio de objetivos. Este fenómeno puede surgir cuando la magnitud de uno de los objetivos es considerablemente mayor que la de los demás, dando lugar a que los puntos que optimizan dicho objetivo ejerzan una dominación excesiva en la evaluación. En este contexto, se identifica la necesidad de implementar la normalización con el fin de mejorar los resultados y facilitar una comparación imparcial y equilibrada entre los diferentes objetivos. Para llevar a cabo la normalización de las funciones objetivo, se aplican las siguientes ecuaciones.

$$F_{1_{\text{norm}}} = \frac{f_1(x) - f_1(x)^{\min}}{f_1(x)^{\max} - f_1(x)^{\min}}; \quad F_{2_{\text{norm}}} = \frac{f_2(x) - f_2(x)^{\min}}{f_2(x)^{\max} - f_2(x)^{\min}}$$

donde f_1 y f_2 representan las funciones objetivo originales. $f_i(x)^{\min}$ y $f_i(x)^{\max}$ denotan los valores mínimos y máximos de las funciones objetivo, respectivamente. Estos valores se obtienen mediante la optimización individual de cada función objetivo, y los resultados se presentan en la [Tabla 3.9](#). Por ejemplo, consideremos los valores $f_1 = 1137.8$ y $f_2 = 300.8$. Aplicando la fórmula de normalización con los valores mínimos y máximos de la [Tabla 3.9](#), obtenemos $F_{1_{\text{norm}}} = 0.95$ y $F_{2_{\text{norm}}} = 0.38$. Estos valores normalizados están en el rango de 0 a 1, permitiendo una comparación más directa y significativa entre las dos variables.

Una vez normalizados, los valores de $F_{1_{\text{norm}}}$ y $F_{2_{\text{norm}}}$ se multiplican por los pesos asignados.

La función objetivo combinada, $F(x)$, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$F(x) = w_1 \cdot F_{1,\text{norm}}(x) + (1 - w_1) \cdot F_{2,\text{norm}}(x) \quad (3.12)$$

Para el método PSO-MSP, el proceso de normalización es similar, pero incluye el último término de la ecuación (3.11).

Tabla 3.9. Valores mínimo y máximo de las funciones objetivo utilizados en el cálculo.

w_1	Función objetivo	Función optimizada	FMinCon-MSP	PSO-MSP
1	$f_1(x)$	$f_1(x)^{\max}$	-613.5191	1173.2873
1	$-f_1(x)$	$f_1(x)^{\min}$	-1173.34021	613.5978
0	$f_2(x)$	$f_2(x)^{\min}$	70.8825	70.9064
0	$-f_2(x)$	$f_2(x)^{\max}$	677.7351	677.7351

Al implementar la técnica FMinCon-MSP con la función combinada normalizada, se observan nuevos puntos a lo largo de todo el frente de Pareto, como se ilustra en la [Figura 3.17 izquierda](#) en la vista ampliada. Esto se debe a la transformación de los objetivos a una escala comparable y equilibrada, lo que resalta soluciones no dominadas que antes eran difíciles de percibir debido a que algunos puntos estaban superpuestos. Es crucial tener en cuenta que algunas soluciones pueden pasar a ser dominadas por otras tras la normalización de las funciones. Además, la normalización altera la distribución de puntos en el frente de Pareto, generando regiones más dispersas de soluciones.

La normalización resulta esencial para asegurar una comparación justa y objetiva. La elección adecuada de pesos desempeña un papel crucial al establecer un equilibrio entre la ampacidad del cable y el costo de instalación, factores que inciden directamente en la solución final. Estos pesos reflejan las preferencias y prioridades del diseñador, siendo fundamentales para lograr resultados alineados con los objetivos y requisitos específicos del proyecto. Aunque la tarea no es sencilla y carece de una única respuesta definitiva debido a las particularidades de cada situación, existen consideraciones generales que deben tenerse en cuenta al seleccionar los pesos adecuados.

En primer lugar, la seguridad y la confiabilidad del sistema eléctrico son prioridades clave para las empresas en este sector, donde la ampacidad desempeña un rol fundamental al garantizar la confiabilidad del sistema y prevenir posibles sobrecargas que podrían ocasionar fallas o interrupciones. En segundo lugar, la minimización de los costos de instalación

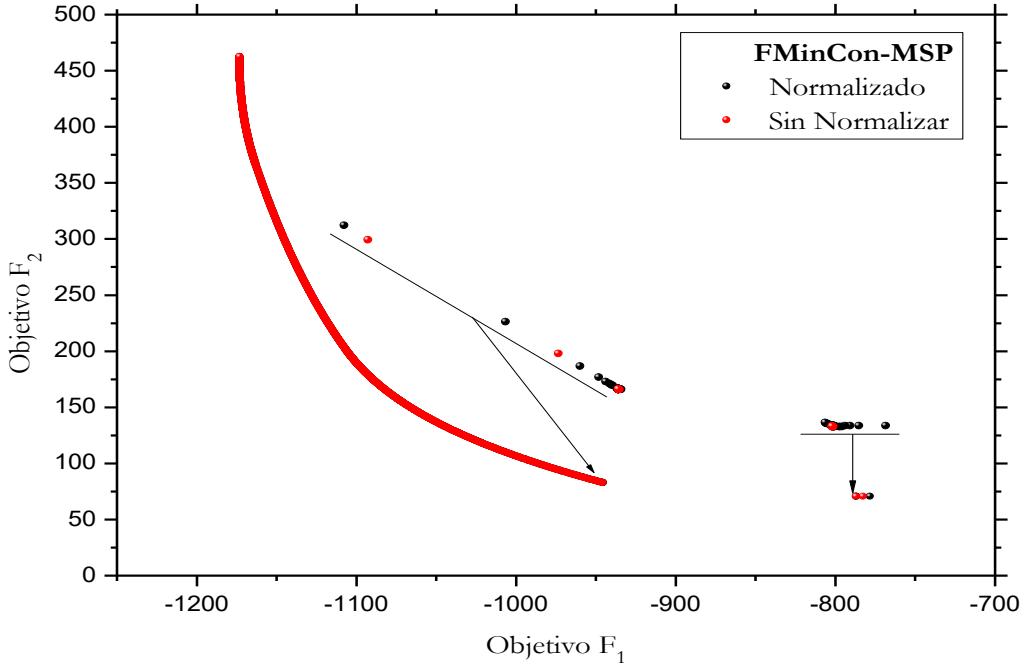


Figura 3.17. Frentes de Pareto Normalizados y No Normalizados.

y operación es esencial para mantener la rentabilidad y competitividad de las empresas eléctricas, por lo que el costo puede ejercer una influencia significativa en la asignación de pesos. Por último, las expectativas de crecimiento a largo plazo en la demanda eléctrica también pueden afectar la importancia relativa de la ampacidad y el costo. Si se anticipa un aumento sustancial en la demanda, la ampacidad del cable puede convertirse en una prioridad para adaptarse a este crecimiento futuro.

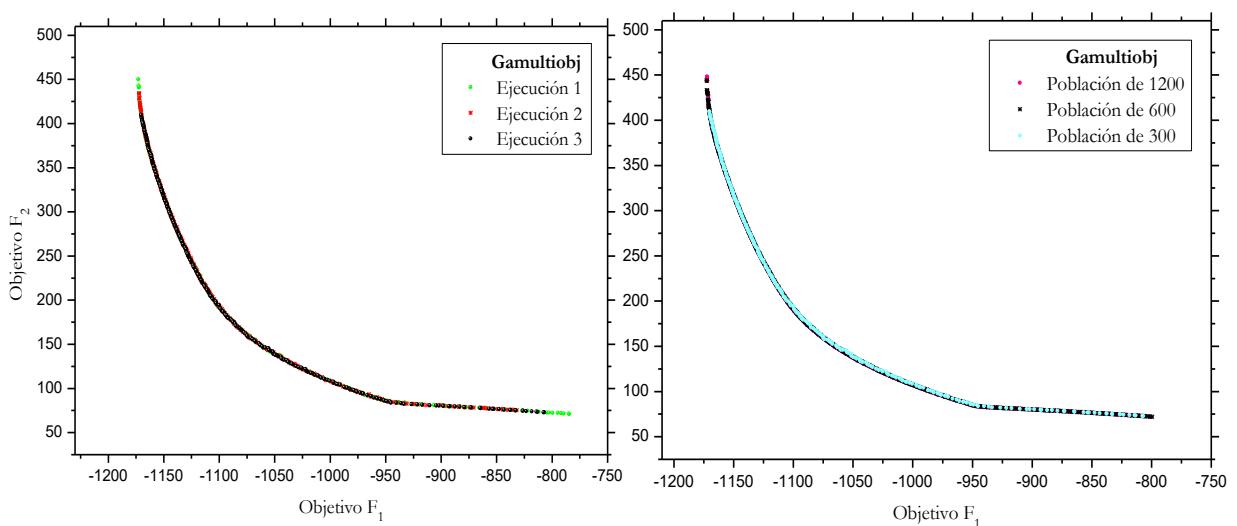


Figura 3.18. Frentes de Pareto con `gamultiobj` para diferentes tamaños de población.

Cuando el diseñador del cable subterráneo busca minimizar los costos del sistema (f_2),

asignar un peso bajo a w_2 (por ejemplo, 0.1 o 0.2 según su criterio establecido) refleja una clara prioridad hacia la reducción de costos en la solución final. En contraste, si el objetivo principal es maximizar la ampacidad del cable sin considerar los costos del sistema, asignar un peso alto a w_1 (por ejemplo, 0.8 o 0.9) indica una preferencia por maximizar la ampacidad del cable en la solución final. Asignar igual peso a $w_1 = 0.5$ y $w_2 = 0.5$ implica que ambos objetivos tienen la misma importancia, como se muestra en la [Tabla 3.10](#), buscando un equilibrio entre bajos costos de instalación y una ampacidad del cable razonable. La elección de pesos adecuados depende de la naturaleza del problema y los criterios de decisión del tomador de decisiones.

Tabla 3.10. Valores óptimos para distintas combinaciones de ρ_r , ρ_s y θ_{amb} con PSO-MSP.

$\rho_r = 0.5$			$\rho_s = 2.5$			$\theta_{amb} = 25$	
w_1	I (A)	C (\$/m ³)	L (m)	L_G (m)	w (m)	h (m)	s (m)
0	758.4528	70.9064	0.9261	0.9261	1.2	0.7477	0.147
0.5	1087.3542	172.106	0.5739	0.7501	2.4669	1.1002	0.9335
1	1173.1045	476.7672	0.5739	1.1706	3.9998	1.9413	1.6999
$\rho_r = 0.7$			$\rho_s = 2.5$			$\theta_{amb} = 25$	
0	764.3762	70.9064	0.9261	0.9261	1.2	0.7477	0.2756
0.5	1060.0103	172.7377	0.5739	0.7533	2.4629	1.1065	0.9314
1	1143.8484	464.8199	0.5739	1.1451	4	1.8901	1.7
$\rho_r = 0.5$			$\rho_s = 2.7$			$\theta_{amb} = 25$	
0	733.2128	70.9064	0.9261	0.9261	1.2	0.7477	0.147
0.5	1054.1843	172.1388	0.5739	0.75	2.4677	1.1	0.9339
1	1138.682	458.67424	0.5739	1.1319	4	1.8638	1.7
$\rho_r = 0.5$			$\rho_s = 2.5$			$\theta_{amb} = 20$	
0	790.8233	70.9064	0.9261	0.9261	1.2	0.7477	0.147
0.5	1124.1283	164.5236	0.5739	0.7511	2.3551	1.1022	0.8775
1	1219.5966	439.9638	0.5739	1.0919	4	1.7839	1.7

Para evaluar los enfoques propuestos, se empleó el algoritmo genético multiobjetivo `gamultiobj` para generar frentes óptimos de Pareto. La [Figura 3.18](#) muestra tres ejecuciones con una población de 855, resultando en 300 puntos de Pareto en aproximadamente 65.4 segundos. Se observó un ligero desplazamiento del frente de manera aleatoria debido a las características intrínsecas del algoritmo. Ajustar el tamaño de la población a 1712 y 3426 individuos permitió obtener 600 y 1200 puntos de Pareto, respectivamente, mejorando la continuidad en los frentes y la calidad de la solución.

En la [Figura 3.19](#), se comparan los frentes de Pareto generados por las técnicas propuestas y `gamultiobj`. PSO-MSP y Fmincon-MSP muestran consistencia y similitud sorprendente con el frente de Pareto de `gamultiobj`. Estos resultados destacan la validez y promesa de las técnicas propuestas para abordar problemas multiobjetivos de manera efectiva.

No obstante, es importante señalar que `gamultiobj` tiene limitaciones en comparación con PSO-MSP, mostrando menor exploración en los extremos del frente de Pareto y mayor variación aleatoria en los puntos de Pareto. Además, carece de una implementación para controlar y cambiar el número de puntos de Pareto, donde PSO-MSP sobresale al generar puntos de manera controlada, superando las limitaciones de `gamultiobj`.

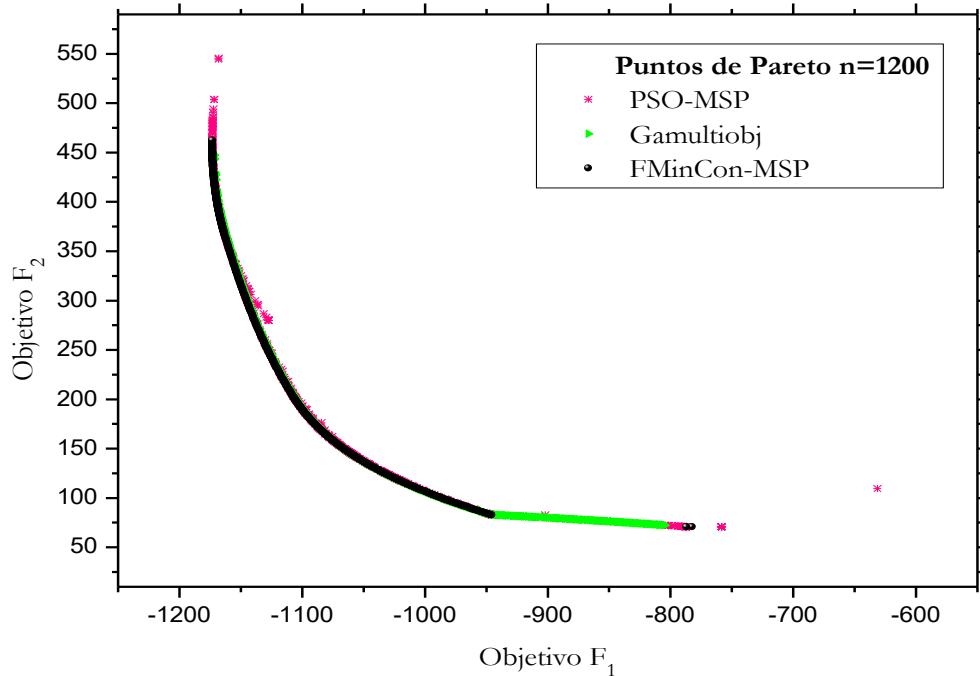


Figura 3.19. Comparación de Frentes de Pareto con técnicas propuestas y `gamultiobj`.

Adicionalmente, los resultados de Fmincon-MSP destacan por su eficiencia en el tiempo de ejecución, siendo notablemente superior a PSO-MSP y `gamultiobj`. Para 600 puntos de Pareto, Fmincon-MSP requiere solo 11.5 segundos, mientras que PSO-MSP y `gamultiobj` demandan 1815.57 segundos y 170.7 segundos, respectivamente. Esta eficiencia se traduce en una mejora significativa, superando a `gamultiobj` en un 93.26%. A su vez, `gamultiobj` es un 90.6% más rápido que PSO-MSP. A pesar de la ventaja en el tiempo de ejecución de Fmincon-MSP, es crucial considerar la exhaustividad de la exploración del frente de Pareto y la estabilidad de las soluciones. En este contexto, el enfoque estocástico y global de PSO lo posiciona como una opción valiosa, al ofrecer una aproximación más completa del frente

de Pareto y abordar problemas complejos de optimización de manera efectiva.

La [Figura 3.20](#) proporciona una comprensión detallada del comportamiento de cada variable de diseño en relación con los valores óptimos de la ampacidad del cable.

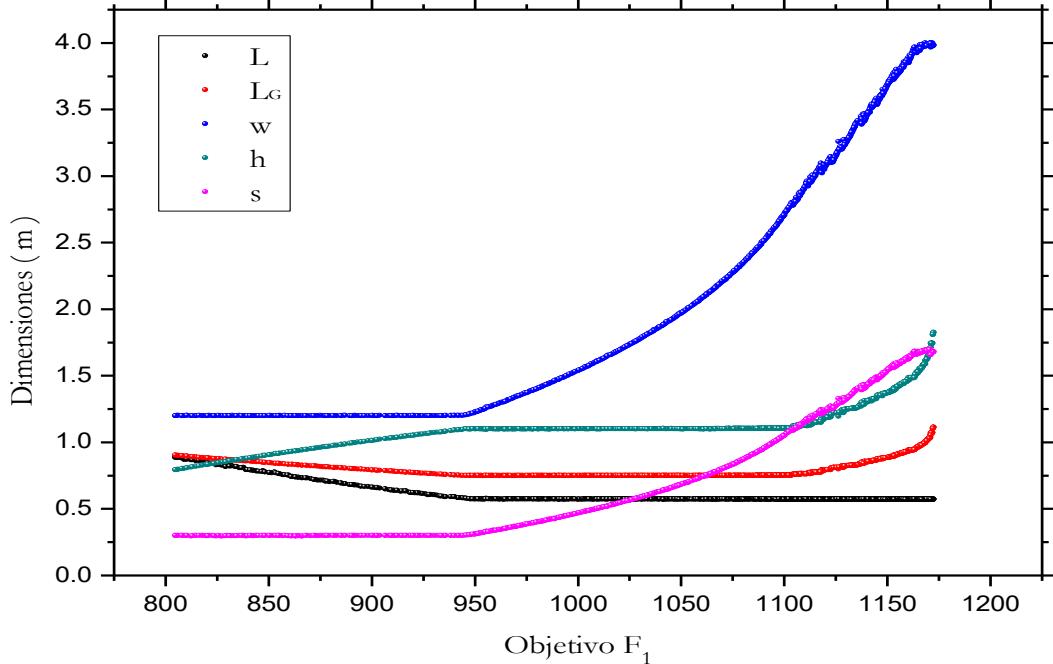


Figura 3.20. Ampacidades Óptimas vs Variables de Diseño Optimizadas.

Al analizar la influencia de los valores de ρ_r , ρ_s , y θ_{amb} en el frente de Pareto, es esencial tener en cuenta que estos parámetros son intrínsecamente aleatorios y susceptibles a variaciones operativas, climáticas, geográficas y estacionales en aplicaciones prácticas. Además, ciertos tipos de suelos pueden experimentar cambios impredecibles en las condiciones ambientales a lo largo de la ruta del cable. Se realizaron múltiples ejecuciones, variando cada parámetro de manera independiente mientras se mantenían constantes los otros dos. Este enfoque resultó en variaciones en los frentes de Pareto en cada ejecución, como se ilustra en la [Figura 3.21](#). Además, en la [Tabla 3.10](#), se presentan comparaciones de resultados para ciertos valores de pesos de ponderación, resaltando, por ejemplo, un rendimiento superior en ampacidad a una temperatura de 20 °C. Para abordar estas incertidumbres y variaciones, es esencial considerar estos parámetros como variables de optimización mediante un enfoque probabilístico. Esto permitirá obtener soluciones robustas y adaptables a condiciones cambiantes en la práctica, asegurando mayor confiabilidad en el diseño y operación de líneas de transmisión.

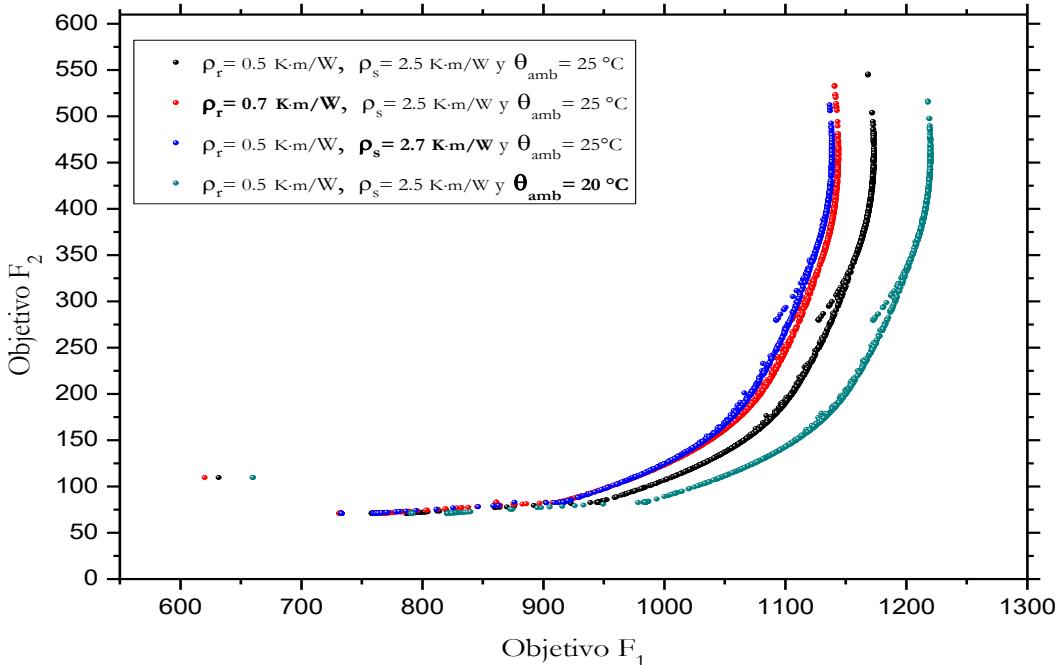


Figura 3.21. Frente de Pareto para Algunos Valores de ρ_r , ρ_s y θ_{amb} .

3.6.5 Conclusiones II

En este estudio, se han propuesto las técnicas FMinCon-MSP y PSO-MSP como soluciones eficientes para abordar el problema de optimización simultánea de la ampacidad y el costo de instalación de cables subterráneos de 220 kV, buscando obtener el conjunto de soluciones de Pareto. La comparación con el algoritmo `gamultiobj` de MATLAB ha demostrado la robustez y consistencia de los algoritmos propuestos en la generación de frentes de Pareto de alta calidad, los cuales son fundamentales para la toma de decisiones en situaciones de optimización multiobjetivo.

Específicamente, el enfoque FMinCon-MSP ha presentado una mejora significativa en el tiempo de ejecución, superando a PSO-MSP en aproximadamente un 99.34%. Esta reducción temporal es una ventaja crucial al permitir la obtención de soluciones de manera más rápida y eficiente. Por otro lado, PSO-MSP destacó por su capacidad de exploración en el frente de Pareto, siendo una ventaja clave de esta técnica en comparación con FMinCon-MSP y `gamultiobj`. En términos de eficiencia temporal, Fmincon-MSP ha demostrado un alto rendimiento al superar a `gamultiobj` en un 93.26%, mientras que `gamultiobj` ha demostrado ser un 90.6% más rápido que PSO-MSP.

La consistencia entre los frentes de Pareto generados por nuestros métodos y la técnica `gamultiobj` valida de manera efectiva nuestro enfoque en la resolución de problemas mul-

tiobjetivos. Esta técnica no solo permite visualizar el frente de Pareto, sino que también facilita la elección de soluciones óptimas basadas en las necesidades específicas del diseñador, logrando un equilibrio eficiente entre el costo de instalación y la ampacidad del cable. Esto asegura un rendimiento óptimo y económico del sistema en cuestión. Nuestra propuesta de diseño de instalación ofrece ventajas significativas a la industria al generar ahorros en futuros diseños y mejorar las instalaciones existentes de sistemas de cable de alta tensión. Además, nuestros resultados destacan la importancia de adoptar un enfoque probabilístico para optimizar los diseños de sistemas de cable con mayor precisión y realismo.

3.7 Optimización Multiobjetivo

La optimización multiobjetivo con tres objetivos plantea un desafío significativo debido a la mayor complejidad asociada. A medida que se incorporan más objetivos, la complejidad computacional aumenta, ya que el número de soluciones en el frente de Pareto puede crecer considerablemente. Además, la disponibilidad de herramientas y métodos consolidados es más limitada en comparación con los problemas de dos objetivos, complicando la elección de la técnica adecuada. Este estudio explora el método de suma ponderada para abordar la optimización multiobjetivo con tres objetivos y analiza cómo la variación de los pesos influye en las soluciones obtenidas. La formulación central se presenta de la siguiente manera:

$$F = w_1 \cdot F_1 - w_2 \cdot F_2 + w_3 \cdot F_3 - k \cdot \text{penalty} \quad (3.13)$$

donde se consideran aspectos cruciales relacionados con la ampacidad del cable (F_1), el costo de instalación (F_2) y el envejecimiento electrotérmico. Además, empleamos el modelo de Arrhenius para describir la vida térmica en ausencia de tensiones significativas adicionales, como se muestra en la [Tabla 2.3](#). La variable F_3 representa la función del tiempo de vida térmica y se expresa mediante el modelo de Arrhenius [14, 175, 176] con la siguiente ecuación:

$$F_3 = L_0 e^{-B \left(\frac{1}{\theta_0} - \frac{1}{\theta_c} \right)} \quad (3.14)$$

La temperatura del conductor de un cable subterráneo desempeña un papel crítico en su vida útil. Cuando esta temperatura excede el límite admisible de 90°C (363 K), la vida útil del cable disminuye rápidamente debido a la aceleración de procesos de degradación. Por otro lado, mantener la temperatura por debajo de este umbral garantiza una vida útil más

larga sin efectos negativos. Los cálculos teóricos y las simulaciones pueden estimar una vida útil aparentemente más larga que la realidad debido a la falta de consideración de factores del mundo real. Por precaución, se establece un límite superior conservador que oscila entre 40 y 55 años para la vida útil. Si las estimaciones superan este límite, se aplica una corrección para ajustarlas y hacerlas más realistas.

Es crucial reconocer dos aspectos fundamentales: primero, la temperatura máxima admisible del conductor (θ_c), y segundo, la generación de temperatura (θ_{carga}) debido a la circulación de una corriente de carga, por ejemplo, 1100 A. Esta generación de temperatura debe estar por debajo del límite admisible, y además, la corriente de carga debe ser menor que la ampacidad del cable. En este contexto, es esencial optimizar la temperatura generada por una carga de 1100 A para maximizar la ampacidad y, al mismo tiempo, extender la vida útil del cable.

Algorithm 5 Generación de Combinaciones de Pesos

```

1: Definir  $n$  como el número de puntos que se desea generar en el vector, es decir, la cantidad
   de valores que deseas obtener dentro del rango de 0 a 1.
2: Crear una matriz  $w\_values$  para almacenar las combinaciones de pesos
3: Inicializar un contador  $counter$  a 0
4: for cada valor  $w_1$  en el rango de 0 a 1 con un espaciado de  $(1/(n - 1))$  do
5:     for cada valor  $w_2$  en el rango de 0 a  $(1 - w_1)$  con un espaciado de  $(1/(n - 1))$  do
6:         Calcular  $w_3$  como  $(1 - w_1 - w_2)$ 
7:         if la suma de  $w_1$ ,  $w_2$  y  $w_3$  es aproximadamente igual a 1 then
8:             Almacenar la combinación de pesos  $[w_1, w_2, w_3]$  en  $w\_values$ 
9:         end if
10:    end for
11: end for
12: Mostrar  $w\_values$ , que contendrá todas las combinaciones de pesos válidos

```

3.7.1 Generación de Combinaciones de Pesos

En el contexto de la optimización multiobjetivo con tres objetivos y pesos variables, se utiliza una técnica que posibilita la generación de todas las combinaciones de pesos cumpliendo con la condición de suma igual a 1. Para lograrlo, se implementa un algoritmo que recorre de manera sistemática el espacio de pesos y calcula las combinaciones válidas, como se detalla en el [Pseudocódigo 5](#).

Cuando se incrementa el valor de n en este enfoque de generación de combinaciones, el número de combinaciones posibles también experimenta un aumento significativo, según

la fórmula $\frac{n \cdot (n+1)}{2}$. Es relevante destacar que, en este ejemplo, se ha optado por un espacio uniforme para los valores de w_1 y w_2 . Esto implica que el procedimiento generará combinaciones equidistantes a lo largo del rango de pesos. Este método de generación de combinaciones ofrece una forma sistemática y controlable de explorar el espacio de pesos, facilitando la obtención de resultados confiables y reproducibles en análisis ponderados.

3.7.2 Determinación del Frente de Pareto de Tres Objetivos

Con base en el [Pseudocódigo 5](#), se ha determinado exitosamente el frente de Pareto, presentado en la [Figura 3.28](#). Utilizando el método de suma ponderada (MSP) y el enfoque de optimización PSO, el algoritmo ha explorado y encontrado soluciones óptimas que optimizan tres funciones objetivo clave: ampacidad (f_1), costo de instalación (f_2) y tiempo de vida del cable (f_3). Estas funciones objetivo influyen significativamente en las dimensiones y parámetros críticos que definen el diseño de cables subterráneos de alta tensión.

Algorithm 6 Algoritmo de Optimización Multiobjetivo con PSO para Tres Objetivos

- 1: Inicializar variables globales w_1, w_2, w_3
 - 2: Definir el número de puntos de Pareto y el tamaño de la población
 - 3: Inicializar matrices para almacenar resultados
 - 4: Generar combinaciones válidas de pesos (w_1, w_2, w_3) que sumen 1 y almacenar
 - 5: Inicializar parámetros de PSO
 - 6: Inicializar una población de partículas (x) con valores aleatorios dentro de los límites
 - 7: Inicializar la mejor solución global (*global_best*)
 - 8: **for** cada iteración (j) en el rango de *MaxIter* **do**
 - 9: Actualizar la velocidad y posición de cada partícula usando PSO
 - 10: Evaluar la aptitud de cada partícula en función de la función objetivo
 - 11: Actualizar la mejor solución local de cada partícula
 - 12: Actualizar la mejor solución global si se encuentra una mejor solución
 - 13: Actualizar la relación de amortiguación w
 - 14: Guardar la mejor aptitud en esta iteración (B) y la posición correspondiente (C)
 - 15: **end for**
 - 16: **for** cada combinación de pesos en *w_values* **do**
 - 17: Calcular la aptitud (f_1, f_2, f_3) utilizando los parámetros óptimos encontrados
 - 18: Almacenar los resultados en las matrices correspondientes
 - 19: **end for**
 - 20: Mostrar los resultados óptimos y generar gráficos
 - 21: Detener el temporizador y mostrar el tiempo de ejecución
-

Este enfoque proporciona a los diseñadores la flexibilidad de adaptar soluciones a las necesidades específicas de cada proyecto, considerando sus prioridades y restricciones particulares. Al asignar un peso igual a los tres objetivos en la función objetivo global, se establece

que ninguno tiene preferencia sobre los demás, buscando un equilibrio equitativo, como se muestra en la [Tabla 3.11](#), donde el tiempo solo se incrementó en 4 años en comparación con el tiempo de referencia. Sin embargo, es esencial destacar que en situaciones del mundo real, los objetivos pueden tener importancias diferentes según las circunstancias. En estos casos, se asignan pesos diferentes para reflejar preferencias específicas. Por ejemplo, al priorizar el tiempo de vida, se asigna un peso de 0.86 a este objetivo y un peso de 0.14 a la ampacidad. Esto resulta en una vida útil de 80 años, una ampacidad de 1170.6 A y un costo de \$411, duplicando el tiempo de vida útil, lo cual beneficia a las empresas. La elección entre asignar pesos iguales a todos los objetivos o pesos diferentes dependerá de la naturaleza y los requisitos específicos de cada problema y proyecto, requiriendo que el diseñador o planificador considere cuidadosamente cuál enfoque es más adecuado en cada situación.

Tabla 3.11. Resultado de la optimización de tres objetivos.

Dimensiones de Instalación		Parámetros y costo	
Variable	Valor (m)	Variable	Valor (m)
L (m)	0.5739	Costo total (\$/m ³)	207.69
L_G (m)	0.7613	Tiempo de vida (Años)	44.21
w (m)	2.9184	Ampacidad (A)	1109.65
h (m)	1.1225	λ_1	2.66
s (m)	1.1592	Pesos (w_1, w_2, w_3)	1.333

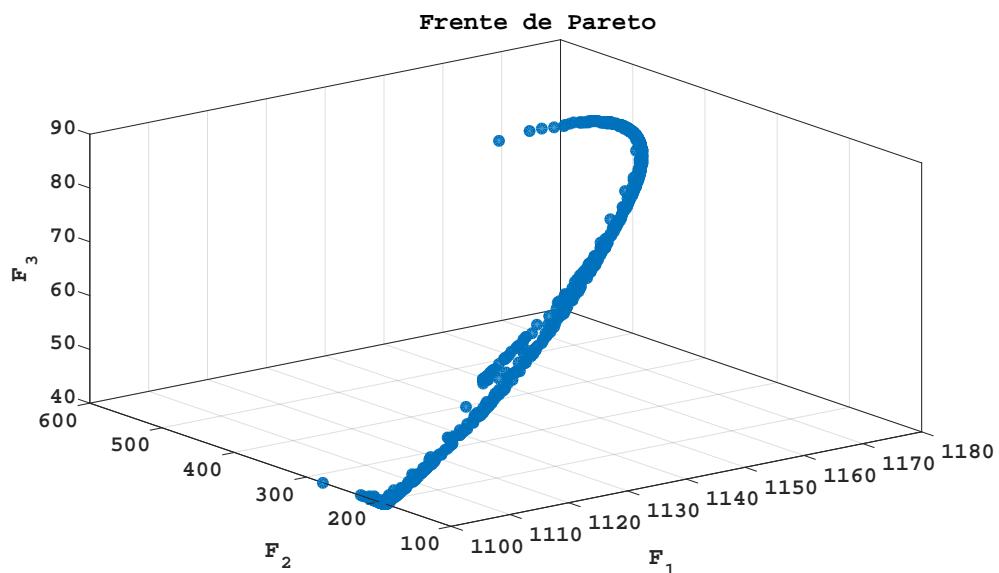


Figura 3.22. Frente de Pareto 3D Obtenido con el Método Propuesto.

3.8 Optimización simultánea de la ampacidad, costo y vida útil considerando parámetros estocásticos

Tradicionalmente, el diseño de sistemas subterráneos de cables de alimentación se ha basado en criterios deterministas. Este proceso involucra la planificación de la ampacidad requerida en el circuito, seguida por la selección del cable y su método de enterrado. La evaluación de la temperatura del conductor (θ_c) y/o la ampacidad del cable (I) suele depender de valores conocidos o asumidos de los parámetros del circuito (valores base o nominales). Sin embargo, estos valores se ven afectados por la corriente de carga (I_{carga}) y factores ambientales críticos, como la resistividad térmica del suelo (ρ_s), la resistividad térmica del relleno (ρ_r) y la temperatura ambiente (θ_{amb}), los cuales exhiben variaciones estadísticas. Aunque algunas investigaciones recientes han abordado aspectos económicos en el cálculo de la ampacidad, han pasado por alto la incertidumbre inherente a estos parámetros [14, 22, 45, 177]. Dado que estos parámetros son aleatorios y algunos de ellos varían a lo largo de la ruta del cable debido a condiciones climáticas y estacionales, se vuelve esencial determinar la ampacidad del cable en la etapa de diseño utilizando un enfoque probabilístico en lugar del enfoque tradicional determinista [31].

Tabla 3.12. Distribuciones de Probabilidad de los Parámetros $\rho_{s,r}$, θ_{amb} e I_{carga} [20].

Distribución	FDP	V. Medio $E(X)$	Varianza $V(X)$
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $-\infty < x \in \{\rho_s, \rho_r\} < \infty$	$E(X) = \mu$	$V(X) = \sigma^2$ σ : desviación estándar
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln x - \theta)^2}{2\omega^2}}$ $0 < x \in \{\theta_{amb}, I_{carga}\} < \infty$	$E(X) = e^{\theta - \frac{\omega^2}{2}}$	$V(X) = e^{2\theta - \omega^2}(e^{\omega^2} - 1)$

3.8.1 Distribución de Probabilidad en Datos Históricos

3.8.1.1 Temperatura ambiente

La variabilidad en la temperatura ambiente se atribuye a factores diversos, como condiciones operativas, climáticas y geográficas. Para analizar esta fluctuación, se recopilan registros diarios, especialmente las temperaturas máximas disponibles a través de servicios públicos.

La Figura 3.23 muestra un diagrama de dispersión que ilustra los picos históricos diarios de temperatura durante un periodo específico. Posteriormente, estos datos se combinan con parámetros de la Tabla 3.12 para construir la distribución de probabilidad de la temperatura ambiente, visualizada en la Figura 3.24. Esta figura exhibe la función de densidad de probabilidad, permitiendo calcular la probabilidad de que la temperatura ambiente (θ_{amb}) supere cierto umbral. Por ejemplo, se puede determinar que la probabilidad de que θ_{amb} exceda los 30 °C es del 15%, y la probabilidad de que se encuentre en el rango de 20 °C a 30 °C es del 50%, entre otros escenarios posibles.

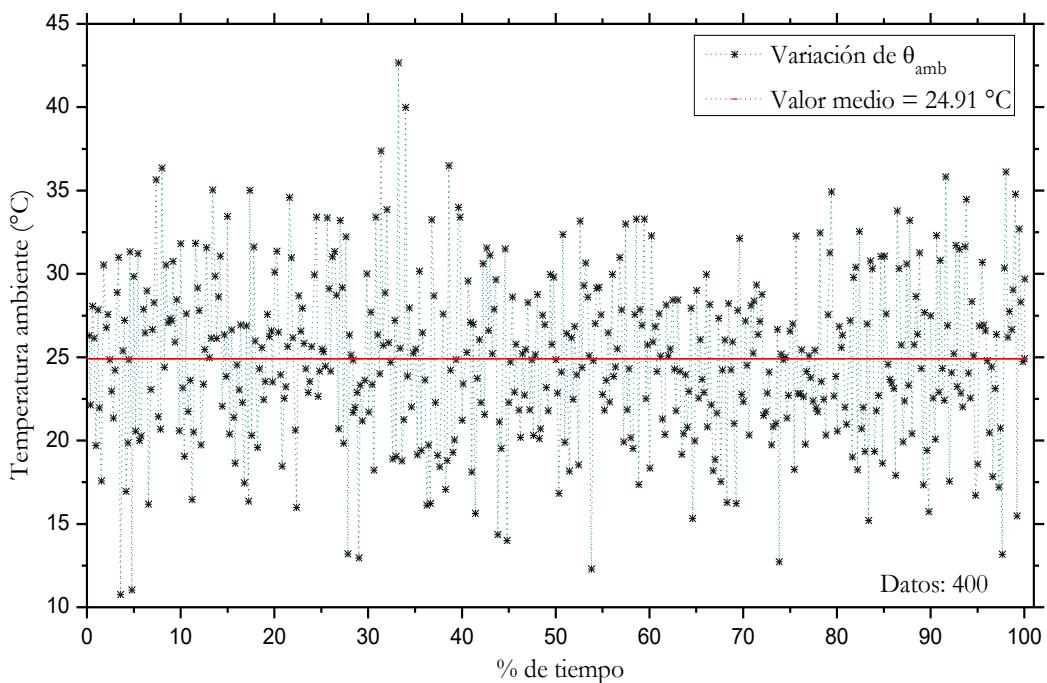


Figura 3.23. Variación de temperatura ambiente en el centro de Toronto.

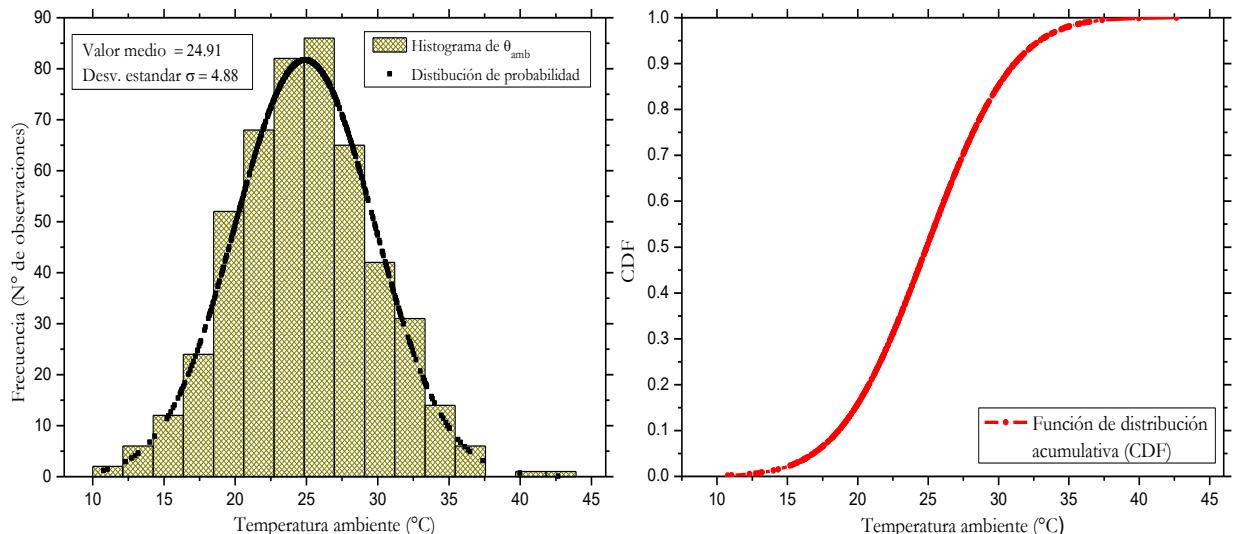


Figura 3.24. Distribución normal ajustada al histograma y CDF de θ_{amb} .

3.8.1.2 Resistividad Térmica del Suelo y Relleno

La resistividad térmica del suelo y relleno se ve afectada por la composición, densidad y contenido de humedad [48]. El contenido de humedad desempeña un papel crucial, especialmente en rellenos específicos, y las variaciones estacionales impactan directamente en la resistividad térmica [178]. A medida que la densidad del suelo aumenta, su resistividad disminuye, reduciendo la influencia de la humedad, especialmente en rellenos compactos.

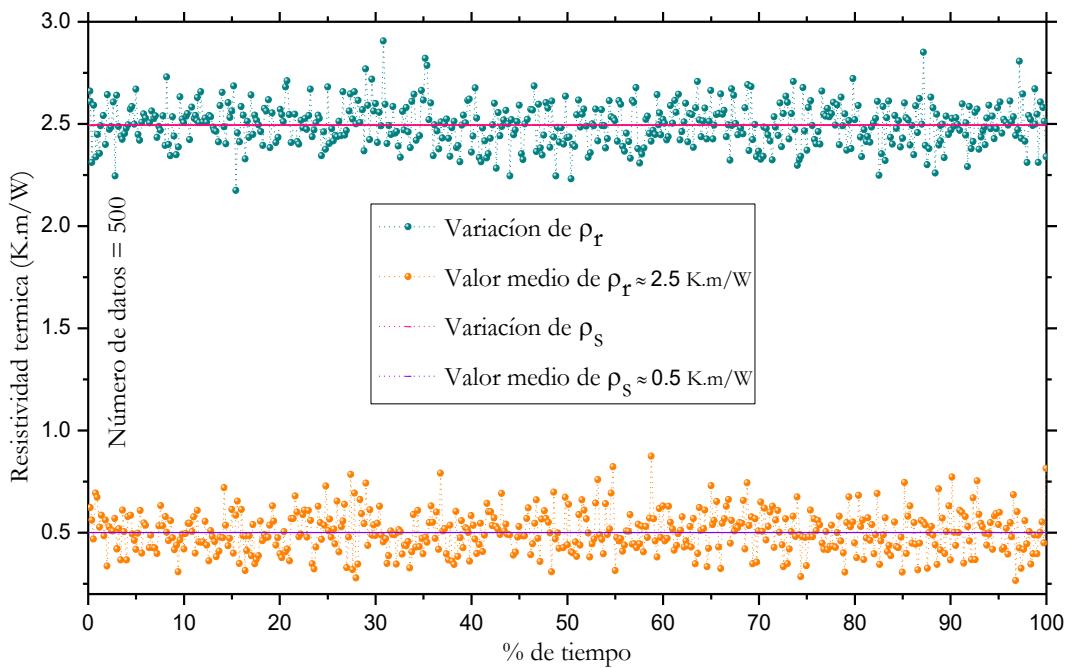


Figura 3.25. Variación de la resistividad del suelo/relleno.

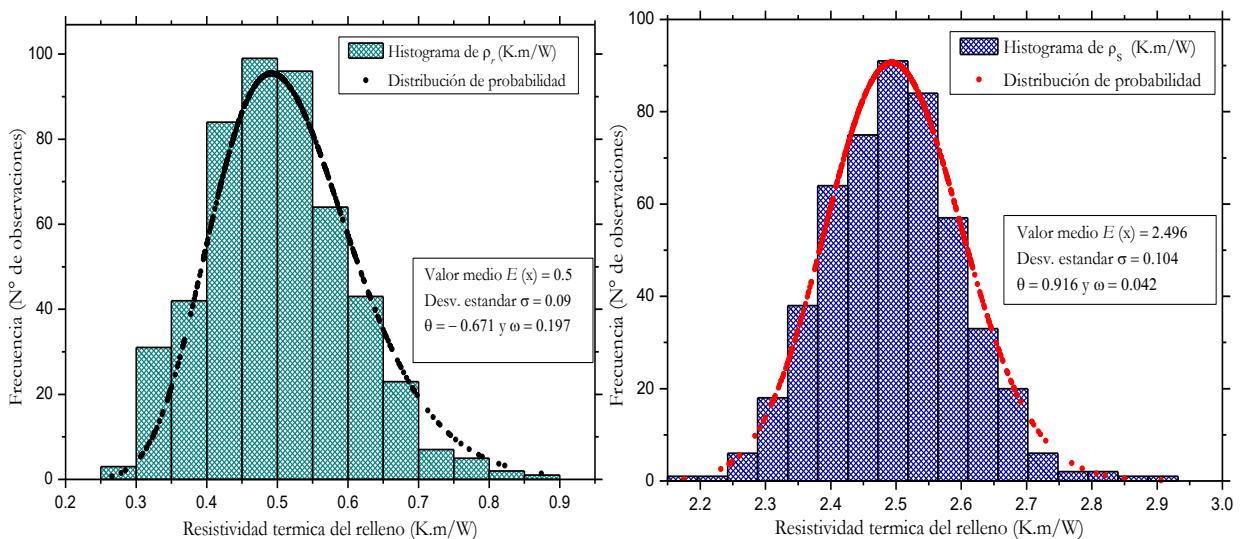


Figura 3.26. Distribución normal ajustada al histograma y distribución acumulada de $\rho_{r,s}$.

Considerando la resistividad térmica del suelo como un parámetro aleatorio debido a

la migración estacional de la humedad y la presencia de fuentes de calor como cables [49], la literatura sugiere que la densidad y otros parámetros del suelo siguen una distribución lognormal [7, 48]. Para abordar esta variabilidad, se realizó un análisis estadístico con datos meteorológicos específicos de una región, como se muestra en la Figura 3.25 [31, 48]. Este análisis generó curvas de distribución de probabilidad para las resistividades térmicas del suelo y relleno, representadas en las Figura 3.26 según la función de distribución de la Tabla 3.12.

3.8.1.3 Variabilidad en la Corriente de Carga

La distribución de probabilidad de las cargas en los cables generalmente se deriva de datos históricos obtenidos de circuitos previamente analizados [18, 31]. No obstante, en situaciones donde estos datos no están disponibles, como en el caso de nuevas instalaciones, es posible recurrir a enfoques alternativos. Por ejemplo, la extrapolación de tendencias demográficas y encuestas de mercado pueden utilizarse para estimar los patrones de consumo esperados

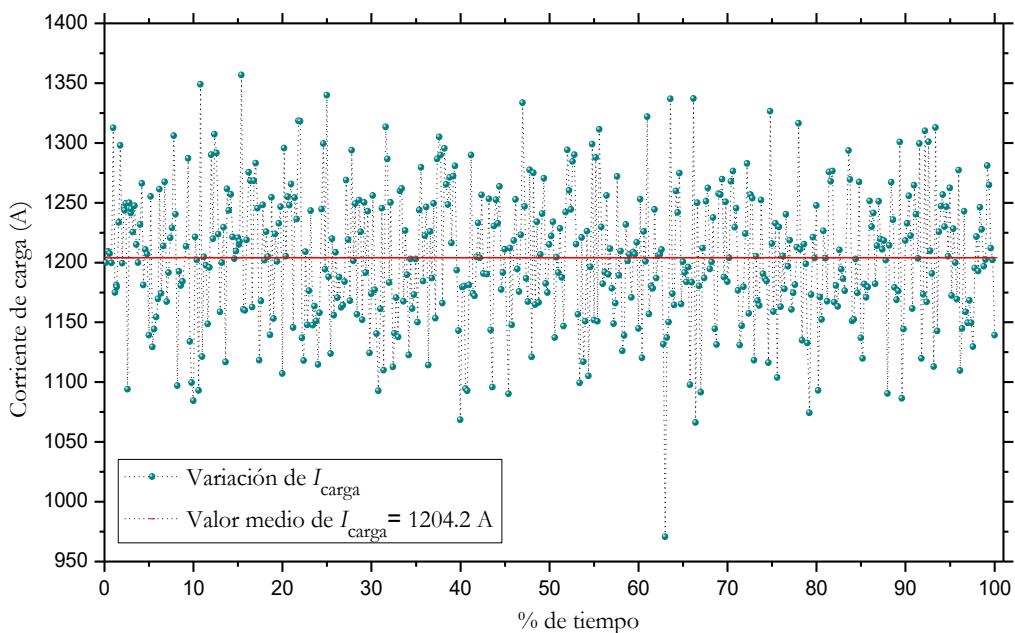


Figura 3.27. Histograma de corriente de carga del sistema de cable.

En la Figura 3.27, se observa claramente cómo varía la corriente de carga a lo largo del tiempo, tal como se ha registrado en el histórico de datos. Esta representación visual permite identificar patrones y tendencias en la demanda eléctrica, ofreciendo una comprensión más profunda de las fluctuaciones de la carga en distintos momentos. Cabe señalar que la corriente de carga está influenciada por el patrón de consumo y puede variar según las condiciones

climáticas y las estaciones del año. En enfoques convencionales, la corriente de carga se evalúa con base en valores deterministas conocidos o supuestos, lo que a menudo lleva a la selección de cables sobredimensionados y a costos adicionales.

Es importante notar que la corriente de carga está influenciada por el patrón de consumo y puede variar según condiciones climáticas y estacionales. Enfoques convencionales evalúan esta corriente en base a valores deterministas conocidos o supuestos, lo que lleva a menudo a seleccionar cables sobredimensionados y a costos adicionales.

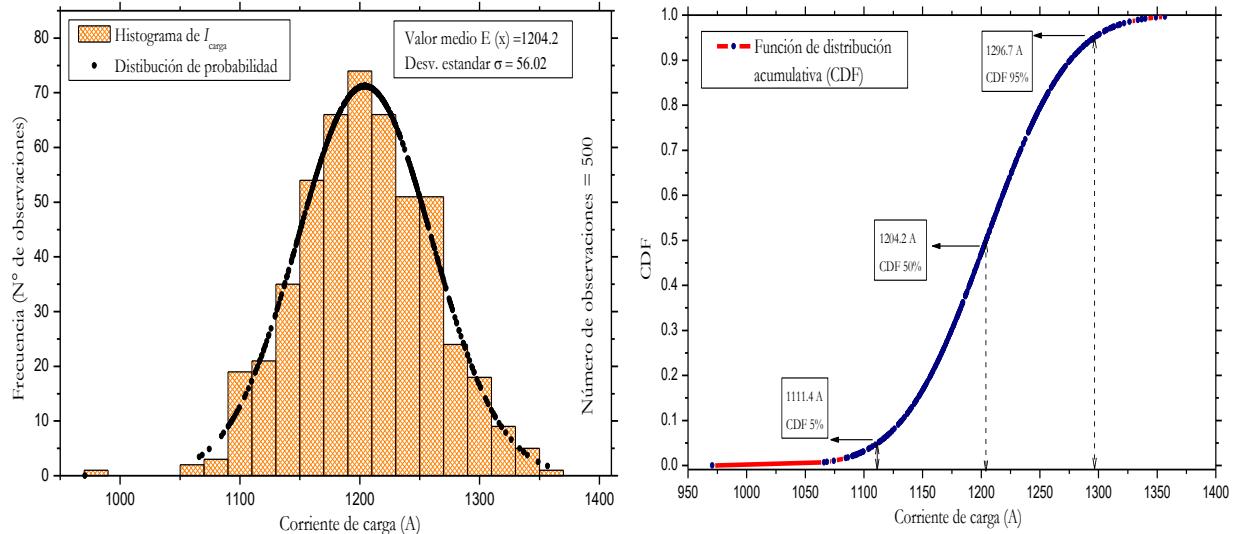


Figura 3.28. Distribución normal ajustada al histograma y distribución acumulada de la corriente de carga.

La Figura 3.28 exhibe una corriente de carga con su función de distribución acumulativa (CDF) de probabilidad normal. Según la figura, la corriente de carga varía entre 970.7 A y 1356.7 A. Sin embargo, la Figura 3.28 derecha revela que la probabilidad de que la corriente de carga exceda los 1296.7 A es del 5% del tiempo, y la corriente de carga asociada al 50% de probabilidad es de 1204.2 A. Esto destaca la necesidad de calcular la ampacidad y el tamaño del cable de manera probabilística, para lograr un análisis más preciso y completo de la ampacidad requerida en el sistema eléctrico en cuestión.

3.8.2 Optimización Multiobjetivo Mediante Análisis Monte Carlo y PSO

La optimización es crucial para abordar problemas complejos, pero la presencia de variables estocásticas o incertidumbre, como discutido en la sección 3.8.1, añade complejidad. En esta sección, exploramos cómo la combinación de Monte Carlo y el Algoritmo de Optimización

por PSO puede abordar eficazmente problemas de optimización afectados por aleatoriedad. Para enfrentar estos desafíos, se formuló el problema de diseño de sistemas de transmisión eléctrica como un problema de optimización multiobjetivo, similar a la ecuación (3.13). El objetivo principal consiste en identificar un conjunto óptimo de variables de diseño que maximice la Ampacidad del cable (f_1), minimice los Costos de instalación (f_2) y garantice simultáneamente la máxima vida útil de los cables (f_3).

Es fundamental destacar que el proceso de diseño está sujeto a una serie de restricciones, que incluyen limitaciones en las dimensiones físicas del sistema, como se señala en la ecuación (3.9). Se ha garantizado que tanto θ_c como θ_{carga} no superen los 90 °C ($\leq 90^\circ\text{C}$), estableciendo restricciones de temperatura cruciales para asegurar que el sistema se mantenga dentro de su límite de temperatura de funcionamiento. Además, se ha considerado con detenimiento la incertidumbre inherente en las condiciones ambientales y de carga.

Para abordar esta complejidad, se ha desarrollado una función objetivo global, que se formula de la siguiente manera:

$$F = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 w_j \cdot f_{j,i}(x, \xi_{i,j}) + \sum_{k=1}^8 \text{penalty}_k(x, \xi_{i,k}) \right) \quad (3.15)$$

donde:

N es el número de escenarios de Monte Carlo.

w_j representa los pesos que reflejan la importancia relativa de los objetivos ($f_{j,i}$).

$f_{j,i}$ es una función objetivo de variables x y variables estocásticas ($\rho_{ri,i}, \rho_{si,i}, \theta_{ambi,i}$).

penalty_k se utiliza para penalizar las violaciones de restricciones.

La penalización se aplica para garantizar que se cumplan todas las restricciones del problema y se formula de la siguiente manera:

$$\text{penalty}_k(x, \xi_{i,k}) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_k(x, \xi_{i,k}) \leq 0 \\ k \cdot g_k(x, \xi_{i,k}) & \text{si } g_k(x, \xi_{i,k}) > 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

En esta formulación, penalty_k toma el valor de cero si la restricción g_k no se viola ($g_k \leq 0$). Si la restricción g_k se viola ($g_k > 0$), entonces la penalización se calcula como $k \cdot g_k$, donde k es un coeficiente de penalización. Puedes ajustar el valor de k según la magnitud de la penalización que deseas para las violaciones de restricciones.

Para optimizar sistemas de transmisión eléctrica subterránea de alta tensión y gestionar la incertidumbre inherente, se implementa un enfoque combinado de Monte Carlo y el algoritmo de Optimización PSO. Este método involucra la generación de escenarios estocásticos mediante distribuciones de probabilidad que abarcan diversas condiciones ambientales y propiedades de materiales, como temperatura, resistividad térmica y corriente de carga. Cada escenario se evalúa exhaustivamente a través de la función objetivo definida por la ecuación 3.15, diseñada para optimizar simultáneamente múltiples aspectos del sistema.

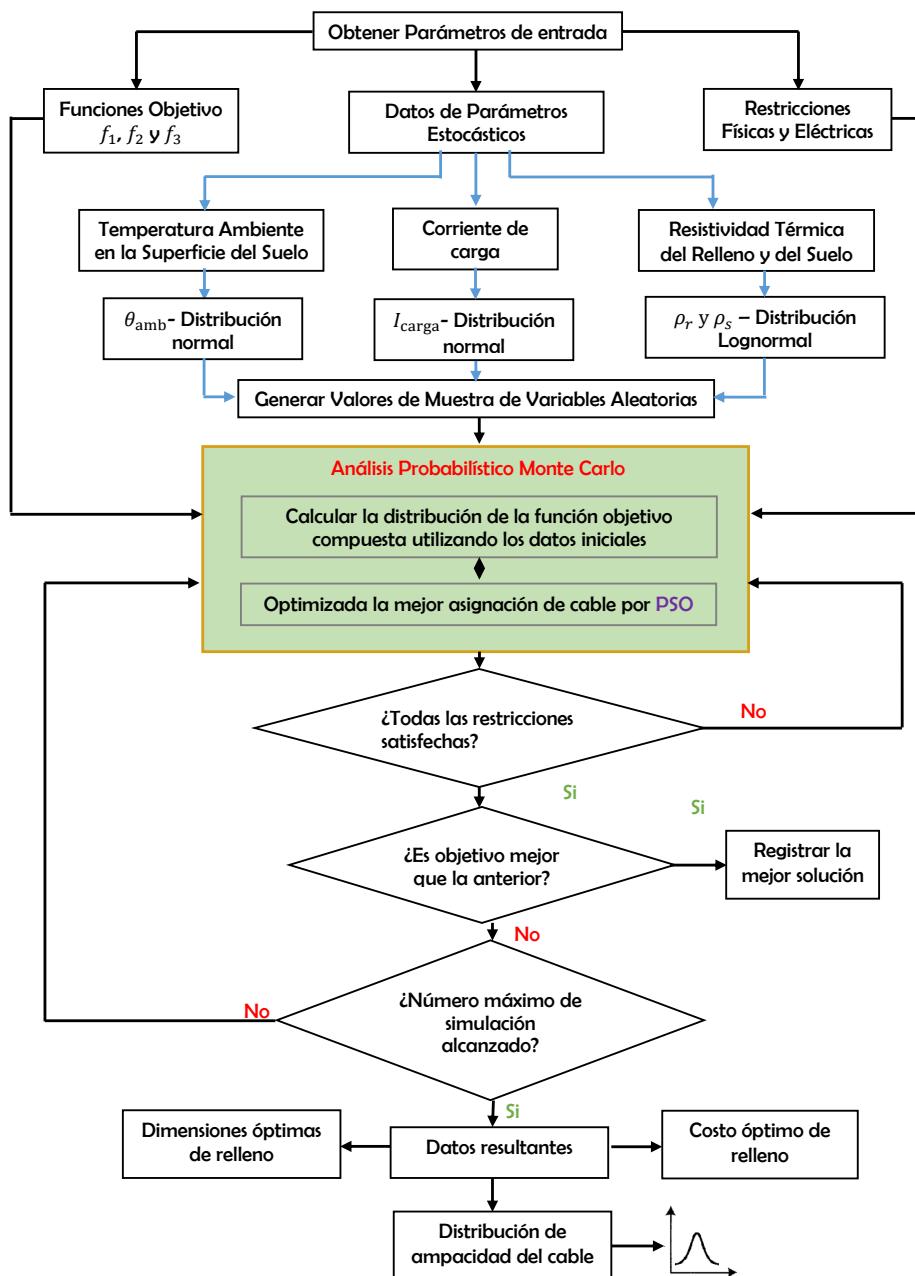


Figura 3.29. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto usando enfoques Monte Carlo y PSO.

Una vez obtenidos los escenarios, el algoritmo PSO evalúa y mejora las soluciones óptimas derivadas de estos escenarios estocásticos. Iniciando su búsqueda desde una población inicial de soluciones representadas como *partículas* y procede de manera iterativa en busca de soluciones óptimas que sean efectivas bajo diversas condiciones. La evaluación se realiza mediante una función objetivo global que pondera las funciones individuales y penaliza las desviaciones respecto a las restricciones establecidas.

Este proceso iterativo permite que las partículas se adapten en respuesta a la información sobre las mejores soluciones encontradas hasta ese momento, buscando converger hacia soluciones altamente eficientes. Concluida la optimización mediante PSO, se almacenan los resultados para cada escenario estocástico, permitiendo evaluar la eficacia de las soluciones óptimas en diversas condiciones.

El diagrama de flujo de la metodología se presenta en la [Figura 3.29](#), proporcionando una representación visual del proceso. La combinación de estas técnicas es especialmente valiosa en entornos donde la incertidumbre y la aleatoriedad son críticas, como en sistemas de transmisión eléctrica. Este enfoque facilita la identificación de soluciones destacadas en diversas condiciones, beneficiando la toma de decisiones y la planificación en situaciones complejas y dinámicas.

3.8.3 Resultados de la Optimización

En esta sección, se presentan los resultados de la estrategia de optimización que combina el método de Monte Carlo con el algoritmo PSO, mejorando su capacidad mediante dos elementos clave: la Inercia Dinámica y la Adaptación de Aceleraciones. La Inercia Dinámica, representada por la variable w , guía la exploración y explotación del espacio de búsqueda al variar dinámicamente a lo largo de las iteraciones (iniciando en 0.9 y disminuyendo gradualmente hasta alcanzar 0 al final). Este enfoque favorece la exploración inicial y la explotación posterior, adaptándose a la topología del espacio de búsqueda.

Otro componente esencial es la adaptación de las aceleraciones c_1 y c_2 , que influyen en el movimiento de las partículas en el espacio de búsqueda. Con el objetivo de equilibrar la exploración, que implica una búsqueda amplia de soluciones, y la explotación, centrada en el refinamiento de soluciones prometedoras, se ha implementado un ajuste gradual de estas aceleraciones. Inicialmente, c_1 disminuye de 2 a 0.5, fomentando la exploración, mientras que c_2 aumenta de 0.5 a 2, promoviendo la explotación a medida que avanzan las iteraciones.

La implementación y evaluación del algoritmo PSO se llevaron a cabo en dos contextos: determinista y probabilístico. En el enfoque probabilístico, PSO se combinó con Monte Carlo para generar 1000 escenarios y evaluar la función objetivo compuesta (3.15). En el enfoque determinista, considerando valores medios de variables estocásticas y sin corriente de carga, se obtuvo una ampacidad de 1109.7 A, un costo de \$207.9, y una vida útil de 40 años, con dimensiones específicas ($L = 3.91$ m, $L_G = 0.95$ m, $w = 1.11$ m, $h = 1.11$ m y $s = 1.45$ m). Esto asume que las condiciones promedio representan el escenario más común, ofreciendo una visión equilibrada de las condiciones ambientales y del suelo. No obstante, es crucial señalar que esta ampacidad no es apropiado para la corriente de carga media, como se evidencia en la Figura 3.28. Los resultados indican que modificar solo el relleno térmico y sus dimensiones no cumple con los requisitos de corriente de carga. Para una solución efectiva, es esencial abordar la variación en el diámetro del cable, un aspecto que se explorará en las próximas secciones.

Es fundamental resaltar que la ampacidad del cable no es constante y puede variar según factores como la resistividad del suelo y la temperatura ambiente. En este análisis, se consideró el escenario más desfavorable, típico en situaciones de diseño real, donde los ingenieros adoptan un enfoque conservador para garantizar la seguridad y el rendimiento óptimo. Este enfoque implica considerar las condiciones ambientales y del suelo más desafiantes. En la búsqueda del escenario conservador, se identifica aquel donde la función objetivo compuesta es mínima. Para este escenario optimizado, la ampacidad debe superar la corriente de carga, asegurando que se consideren las condiciones más desfavorables para el rendimiento del cable subterráneo.

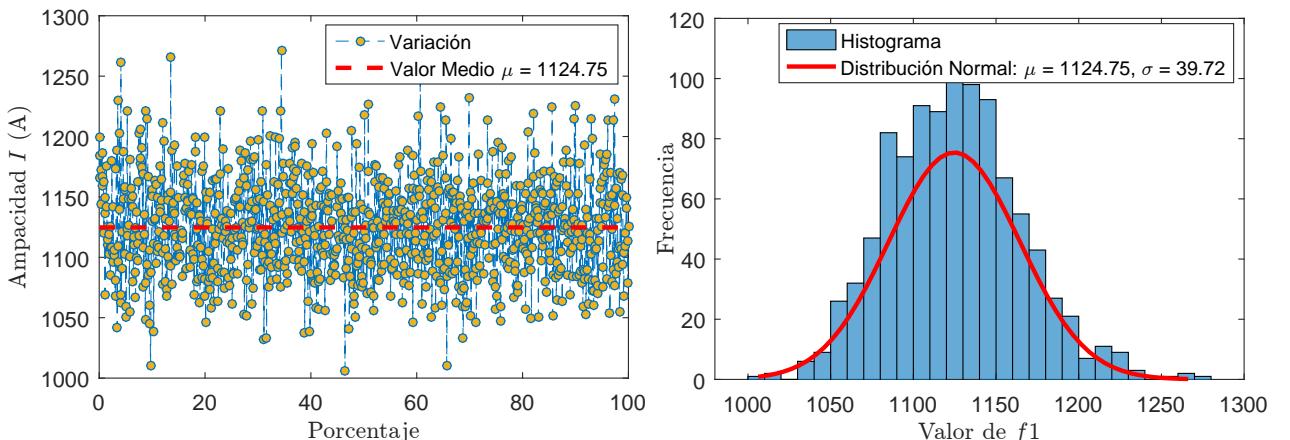


Figura 3.30. Variación de la Ampacidad en Cada Escenario.

La relación entre la temperatura y la resistividad del suelo es esencial, ya que influye directamente en la ampacidad del cable. En los escenarios generados mediante Monte Carlo, es imperativo mantener esta relación realista, asegurándose de que la temperatura y la resistividad del suelo sean coherentes en cada escenario. Esto refleja las condiciones que podrían ocurrir juntas en la vida real. Por ejemplo, si se selecciona una temperatura alta para un escenario particular, la resistividad del suelo debe ser congruente con las condiciones de alta temperatura. Es importante destacar que la optimización de la ampacidad se analizó previamente y se observó que varía desde un valor mínimo hasta un valor máximo en todo el frente de Pareto.

Para evaluar la capacidad del sistema en relación con la corriente de carga, se considera una corriente de carga de 1000 A. Se generan histogramas que representan la distribución de las ampacidades en diferentes escenarios. Los valores de ampacidad varían en un rango que va desde 1010.14 A hasta 1265.53 A en estos escenarios. En la [Figura 3.30](#), se presenta la variación de la ampacidad en cada escenario y un histograma de frecuencia respectivamente. Notablemente, la distribución de ampacidad se asemeja a una distribución normal, lo que sugiere un comportamiento predecible y cercano a un patrón estándar en nuestra simulación.

Tabla 3.13. Resultados de la Optimización con Corriente de Carga.

Dimensiones de Instalación		Parámetros y costo	
L (m)	0.574	Ampacidad (A)	1124.8 (Medio)
L_G (m)	0.804	Tiempo de vida (Años)	217.9 (Medio)
w (m)	2.862	Costo total (\$/m ³)	138.3 (Medio)
h (m)	1.207	Corriente de Carga (A)	1000
s (m)	1.131	Pesos (w_1, w_2, w_3)	1/3

Adicionalmente, en la [Figura 3.31](#), se muestra la probabilidad acumulativa de la mejor ampacidad y la corriente de carga fijada en 1000 A. Las estadísticas correspondientes se resumen en la [Tabla 3.13](#). Estos datos nos proporcionan una cantidad sustancial de información adicional útil. La observación clave aquí es que la mayoría de las ampacidades calculadas se sitúan por encima de este umbral de corriente de carga. Esto indica que, en la mayoría de los escenarios simulados, el sistema sería capaz de manejar la corriente de carga especificada sin sobrepasar los límites establecidos. Este hallazgo resalta la importancia de contar con un margen de seguridad en el diseño del sistema. Es fundamental para comprender la probabilidad de que el diseño funcione adecuadamente en la práctica. Existe

aproximadamente un 10% de probabilidad de que la ampacidad del cable sea mayor que 1175.98 A y un 10% de probabilidad de que sea inferior a 1076.75 A. La ampacidad para cumplir con la corriente media de carga de la [Figura 3.28](#) es considerablemente baja, con tan solo un 3% de probabilidad. Es importante recordar que se deben ajustar los pesos para dar mayor importancia a los objetivos; en este caso, solo estamos analizando el caso de igual peso y una corriente fija.

En la [Tabla 3.13](#), el valor medio de la ampacidad, que es de 1124.8 A, representa el promedio esperado de las variables a lo largo de múltiples escenarios. El uso de este valor medio se considera un enfoque más optimista en lugar de uno conservador, ya que no subestima los riesgos en situaciones adversas.

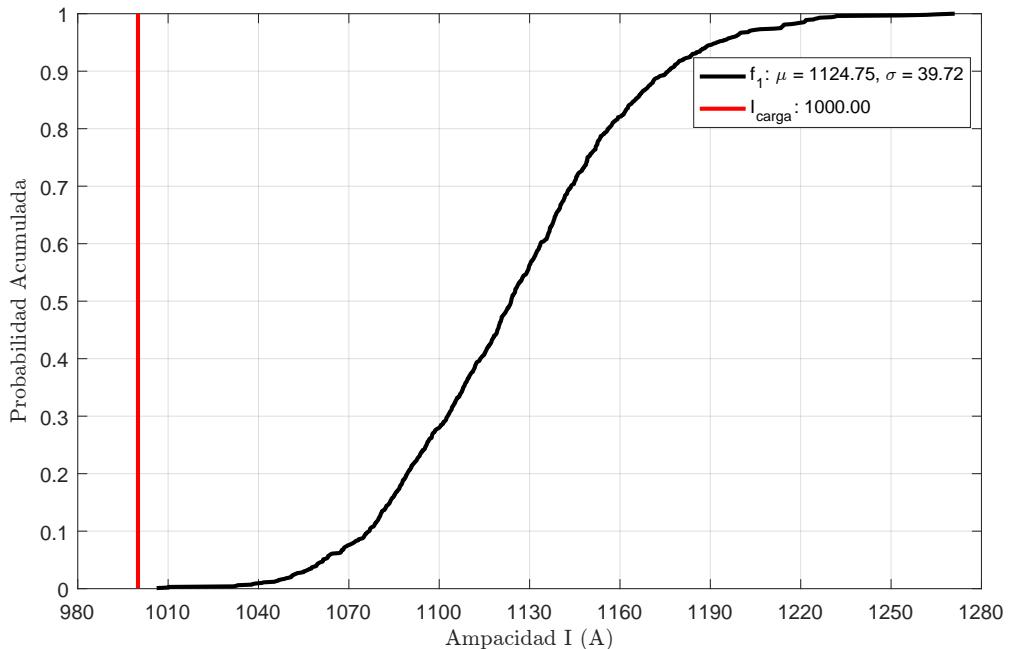


Figura 3.31. Distribucion acumulado de Ampacidad.

Un escenario desfavorable se define por un conjunto específico de condiciones estocásticas, que en este caso implica una combinación de temperatura ambiente y resistividad térmica que resulta en una ampacidad significativamente menor que el valor medio, que en nuestro caso es de 1010.14 A, con un costo de \$218.09. Es importante destacar que la vida útil real del cable se encuentra prácticamente en 44.94 años. Aunque el diseño para la corriente de carga de 1000 A es suficiente, este diseño conlleva un costo ligeramente superior al valor medio de la ampacidad. La evaluación de la vida útil indica que si la vida útil calculada excede los 50 años, la limitación no será térmica, sino que estará restringida por tensiones

eléctricas, mecánicas y físicas.

El análisis de la distribución probabilística implica considerar todas las posibles condiciones y variables que pueden ocurrir, proporcionando una comprensión más completa del comportamiento del sistema en una gama de condiciones. Proporciona información sobre la probabilidad de que ocurran ciertos eventos y cómo se distribuyen los resultados. Los resultados sugieren que el diseño propuesto es robusto y capaz de manejar la corriente de carga especificada en la mayoría de los escenarios, lo que proporciona una base sólida para la toma de decisiones en el diseño y operación del sistema.

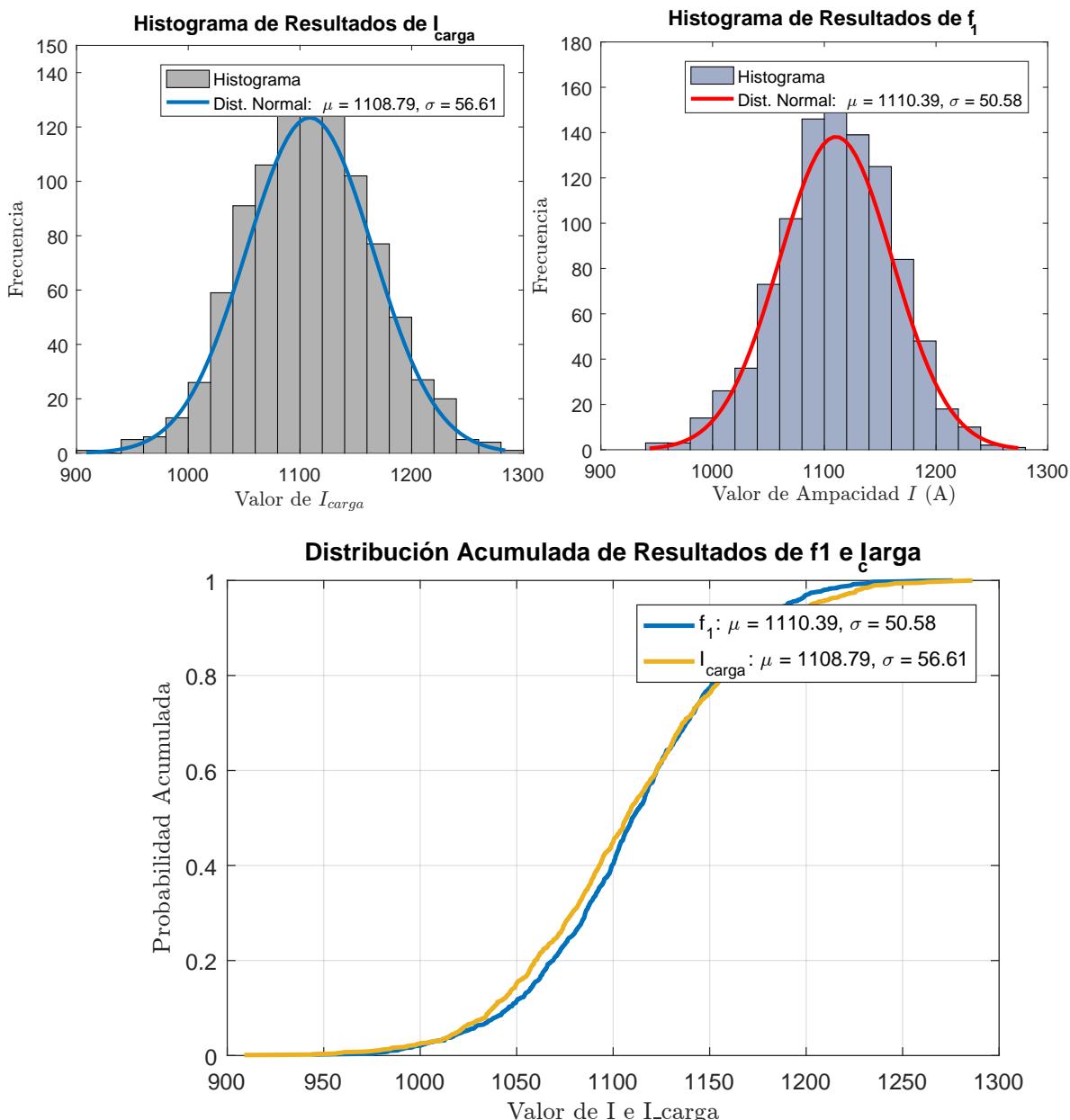


Figura 3.32. Histogramas y Distribución Acumulada de Ampacidad para Valores Fijos de x

En el enfoque conservador, los ingenieros optan por no considerar la variabilidad de las variables estocásticas y, en su lugar, utilizan valores promedios fijos y deterministas para todas las variables. Con el propósito de visualizar el comportamiento de la función objetivo bajo esta perspectiva, se aplicó inicialmente PSO para obtener los valores óptimos de x , como se detalla en el tercer párrafo de esta sección. Posteriormente, se utilizó el método de Montecarlo para evaluar la ampacidad, tal como se muestra en la [Figura 3.32](#).

La [Figura 3.32](#) representa los histogramas y la distribución acumulada de la ampacidad para valores fijos de x . Utilizando un conjunto de datos generado a partir de los registros de la corriente de carga, con una desviación estándar de aproximadamente 56 y un valor medio de 1110 A, se comparó con la ampacidad calculada para un peso de 1/3. Los valores medios de la ampacidad, que son de 1110 A, junto con un costo de \$208.4 y un tiempo de vida de 55.3 años, muestran que la corriente de carga de 1108.8 A está efectivamente por debajo de la ampacidad.

En la mayoría de los escenarios, la corriente de carga puede funcionar correctamente. Sin embargo, en algunos escenarios, la corriente de carga es ligeramente superior, lo que resulta en una vida útil mínima y un posible aumento en el desgaste. La elección entre dar prioridad a la vida útil, el costo o la ampacidad dependerá del tipo de problema y de las preferencias del diseñador.

3.8.4 Conclusiones III

En este estudio, se presenta una metodología de optimización simultánea de la ampacidad, el costo de instalación y la vida útil de cables en sistemas de transmisión eléctrica subterránea de alta tensión. Al combinar el método de Monte Carlo con el algoritmo PSO, se obtiene una comprensión más profunda de cómo la variabilidad y la incertidumbre en las variables estocásticas pueden influir en el comportamiento de estos sistemas.

La metodología incluye elementos clave, como la Inercia Dinámica y la Adaptación de Aceleraciones, que mejoran la capacidad del algoritmo para abordar los desafíos de la optimización. Este enfoque eficaz permite considerar variables estocásticas como la resistividad térmica del relleno, las propiedades del suelo nativo, la temperatura ambiente y la corriente de carga, evitando la necesidad de métodos deterministas y escenarios de peor caso que a menudo conducen a un sobredimensionamiento innecesario y costos adicionales.

Asimismo, se destaca la relevancia del relleno y se han calculado sus dimensiones óptimas.

El logro más significativo de este trabajo es la inclusión de la vida útil del cable como variable en el proceso de dimensionamiento, brindando a los ingenieros una herramienta fundamental para determinar el tamaño del cable de manera informada.

La combinación de simulación probabilística y enfoque conservador proporciona a los ingenieros y diseñadores una valiosa herramienta para tomar decisiones informadas en el diseño y operación de sistemas eléctricos subterráneos. La capacidad de comprender y abordar la variabilidad y la incertidumbre es esencial para garantizar un rendimiento confiable y seguro del sistema en diversas condiciones. La integración de la variabilidad y la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones es fundamental para enfrentar los desafíos del mundo real y garantizar un rendimiento confiable de los sistemas eléctricos subterráneos.

Conclusiones

En este capítulo, se exponen las conclusiones extraídas tras analizar el grado de cumplimiento de los objetivos ([O1](#), [O2](#) y [O3](#)) establecidos en el marco de este proyecto de investigación doctoral. Asimismo, se profundiza en las implicaciones que se desprenden de los resultados obtenidos, los cuales han sido analizados desde un enfoque riguroso y sistemático, también se destacan algunas de las posibles líneas futuras de investigación que se derivan de los hallazgos obtenidos, explorando así su potencial para ampliar el conocimiento en la materia tratada. En este sentido, se proporciona una visión global de los resultados obtenidos y su impacto, así como una orientación clara y precisa sobre las áreas de conocimiento que podrían verse beneficiadas con la continuación de esta investigación.

4.2 Conclusiones generales de la investigación

Durante la investigación realizada, se han identificado los factores críticos que afectan la ampacidad de los cables subterráneos, entre ellos la resistencia térmica del suelo, la geometría del cable, la temperatura ambiente y las condiciones de carga. Se ha implementado una metodología de optimización precisa y eficiente para el diseño y la optimización de cables subterráneos de alta tensión. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de la metodología propuesta, que incluye la optimización monoobjetiva de la ampacidad del cable y la optimización multiobjetiva del costo de instalación y la vida útil máxima de los cables, garantiza un funcionamiento seguro y confiable en cualquier condición de carga y ambiente. La implementación de esta metodología se ha demostrado como una herramienta eficaz para dimensionar y disponer adecuadamente los cables subterráneos de alta tensión, maximizando su capacidad de carga, minimizando los costos y alargando su vida útil. En las secciones siguientes, se detallan las conclusiones obtenidas en cada uno de los objetivos propuestos.

4.2.1 [O1](#). Optimización monoobjetiva de la ampacidad de cable

En el capítulo 3 de esta tesis doctoral, se detalla la disposición de cables de alta tensión en una formación plana regular (consulte la [Figura 3.1](#)) junto con el diseño correspondiente del cable (consulte la [Figura 3.2](#)). En la sección 3.6, se presenta una formulación de optimización

monoobjetiva que aborda las restricciones físicas y económicas. Este enfoque responde a la necesidad de contar con una metodología y técnica de optimización aplicable tanto en la instalación inicial como en la etapa final de máxima capacidad de funcionamiento de los cables.

Para alcanzar este objetivo, se propuso variar el relleno térmico sin modificar el área transversal del núcleo del conductor del cable, lo que planteó un problema de optimización monoobjetivo. Se desarrollaron dos algoritmos de optimización, a saber, el "Algoritmo Genético (GA) con Reinicio Adaptativo" y el "Particle Swarm Optimization (PSO) con Reinicio Adaptativo-Inercia Aleatoria y Búsqueda Local," los cuales se implementaron utilizando Matlab. Los resultados obtenidos indican que estos algoritmos ofrecen soluciones más precisas y consistentes en comparación con los enfoques tradicionales. La ampacidad óptima encontrada para el cable con relleno térmico aumentó aproximadamente un 20.55 % en comparación con el cable sin relleno. No obstante, es importante considerar la sensibilidad a variaciones en la resistividad térmica del suelo, el relleno y la temperatura ambiente.

El método propuesto no solo permite una optimización eficiente y de fácil implementación, sino que también puede generar ahorros significativos dependiendo del tipo de proyecto y la demanda eléctrica. Puede aplicarse en sistemas de cables subterráneos en la etapa de diseño o en sistemas existentes. En muchos casos, invertir en relleno térmico resulta más beneficioso que invertir en cables con un mayor área transversal. Este enfoque representa una herramienta valiosa para la toma de decisiones en las primeras etapas del proyecto y para mejorar la eficiencia energética de los cables existentes en la etapa final.

4.2.2 O2. Optimización multiobjetiva de la ampacidad de cable y costo de instalación

La tesis doctoral presenta un enfoque revolucionario para optimizar la configuración de cables subterráneos, superando las limitaciones anteriores y logrando un equilibrio óptimo entre la maximización de la ampacidad y la minimización de los costos. Para alcanzar este objetivo, se emplearon los algoritmos FMinCon y el PSO propuesto (O2), ambos utilizando el método de suma ponderada, y se compararon con el conocido algoritmo gamultiobj de Matlab. La implementación del algoritmo propuesto resultó en soluciones efectivas de Pareto de alta calidad, lo que brinda al diseñador de cables subterráneos la flexibilidad de elegir la solución más adecuada según sus preferencias y objetivos.

Es importante destacar que el método propuesto PSO sobresale por su capacidad de exploración en el frente de Pareto, lo que constituye una ventaja clave en comparación con FMinCon y gamultiobj. Además, en términos de eficiencia temporal, FMinCon demostró un rendimiento destacado.

Estos resultados resaltan la importancia y la relevancia de esta investigación para la industria de cables subterráneos. Los diseñadores y profesionales ahora tienen a su disposición una herramienta que les permite tomar decisiones informadas y seleccionar la mejor solución de cables subterráneos.

4.2.3 O3. Optimización simultánea del costo de instalación, la ampacidad y la vida útil del cable

La planificación y diseño de instalaciones subterráneas de cables de alimentación requiere de un enfoque más preciso y efectivo que los criterios deterministas presentados en los objetivos 1 y 2. En la formulación del problema de optimización multiobjetivo se consideran una serie de factores importantes, tales como la resistividad térmica del suelo, el material de relleno térmico, las dimensiones de la envoltura del relleno térmico, las ubicaciones de los cables y la temperatura ambiente. Sin embargo, la ampacidad o temperatura de funcionamiento del cable está influenciada por factores aleatorios como la resistividad térmica del suelo, la temperatura ambiente y la corriente de carga del cable, lo que requiere una predicción precisa de sus valores más probables para calcular la ampacidad y la temperatura de funcionamiento del cable. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta la naturaleza estocástica de los parámetros de diseño en entornos térmicos desfavorables, ya que esto podría tener un impacto significativo en la reducción de la ampacidad del cable.

Con el objetivo de abordar esta problemática, se utilizó el método de suma ponderada para tres objetivos clave: el costo de instalación, la ampacidad y la vida útil del aislamiento.

Cabe destacar que el uso de un método determinista y un escenario de peor caso puede conducir a un sobre diseño del sistema de cable y, por lo tanto, a un aumento en el costo del proyecto. Por esta razón, se utilizó una simulación de Monte Carlo (MN) para modelar la incertidumbre de los parámetros y el algoritmo PSO o Fimincon para resolver la optimización simultánea del costo, la ampacidad y la vida útil.

Los resultados obtenidos a través de la optimización simultánea de la ampacidad y la vida útil demuestran que es posible obtener la mejor configuración de disposición del cable

y dimensiones del relleno. Asimismo, se destaca la importancia del relleno y se calculan sus dimensiones óptimas para garantizar la vida útil del aislamiento. El principal resultado de esta investigación es el uso de la vida útil del cable como variable en el dimensionamiento del cable, lo que permite a los ingenieros considerarla como uno de los parámetros más importantes en el diseño de sistemas de cableado subterráneo, garantizando así la fiabilidad y seguridad del proyecto.

4.3 Aportes de investigación

4.4 Aportes de O1.

A continuación se presentan los principales aportes del objetivo 1 ([O3](#)):

1. Diseño y desarrollo de un problema de optimización monoobjetiva con restricciones lineales y no lineales para la ampacidad del cable. Este enfoque mantiene una sección transversal constante en el núcleo del conductor y varía la configuración del relleno térmico.
2. Desarrollo e implementación de dos algoritmos en MATLAB: "GA con Reinicio Adaptativo" y "PSO con Reinicio Adaptativo-Inercia Aleatoria y Búsqueda Local".
3. Propuesta de una herramienta útil para la toma de decisiones tanto en las primeras etapas del proyecto como en la etapa final para mejorar la eficiencia energética de los cables existentes.

4.5 Aportes de O2.

A continuación se presentan los principales aportes de la investigación relacionados con el objetivo 2 ([O2](#)) de la tesis doctoral:

1. Se propuso un problema de optimización biobjetivo mediante el Método de Suma Ponderada (MSP) con penalización autoadaptativa, buscando maximizar la ampacidad y minimizar el costo de instalación de manera simultánea.

2. Desarrollo e implementación de las técnicas FMinCon-MSP y PSO-MSP como soluciones eficientes para la optimización simultánea de la ampacidad y el costo de instalación de cables subterráneos de 220 kV, con el objetivo de obtener conjuntos de soluciones de Pareto.
3. Comparación exitosa con el algoritmo gamultiobj de MATLAB, evidenciando la robustez y consistencia de las técnicas propuestas en la generación de frentes de Pareto de alta calidad, fundamentales para la toma de decisiones en situaciones de optimización multiobjetivo.

4.6 Aportes de O3.

A continuación, se detallan los principales aportes que permitieron alcanzar dicho objetivo:

1. Desarrollo de una metodología pionera para la optimización simultánea de la ampacidad, el costo de instalación y la vida útil de cables en sistemas de transmisión eléctrica subterránea de alta tensión, utilizando el enfoque de suma ponderado penalizado (MSP).
2. Integración efectiva del método de Monte Carlo con el algoritmo PSO, brindando una comprensión profunda de cómo la variabilidad y la incertidumbre en variables estocásticas influyen en el comportamiento de los sistemas eléctricos subterráneos.
3. Incorporación de elementos clave, como la Inercia Dinámica y la Adaptación de Aceleraciones, en el algoritmo PSO para fortalecer su capacidad de abordar los desafíos inherentes a la optimización de sistemas complejos.
4. Utilización del modelo de Arrhenius específicamente diseñado para cables XLPE, permitiendo calcular la vida útil del aislamiento en función de la temperatura de operación y la corriente de carga del cable. Este enfoque resulta esencial para garantizar la fiabilidad del sistema de cableado.

4.7 Líneas futuras de investigación

1. Mejora de la ampacidad del cable: En la fase inicial del proyecto de instalación de cables subterráneos, se podría mejorar la ampacidad del cable no solo variando el

volumen del relleno, sino también el área transversal del cable. Sería valioso proponer un cable óptimo con una mayor ampacidad, lo que permitiría transportar más energía en la misma sección de cable. Esta mejora en la eficiencia energética podría tener importantes implicaciones económicas y ambientales a largo plazo.

2. Ampliación de la investigación a otros entornos: Además de aplicar la metodología desarrollada en esta tesis a sistemas de cableado subterráneo en entornos desfavorables como túneles de calefacción, se podría extender la investigación a otros entornos. Por ejemplo, se podrían estudiar redes eléctricas subterráneas en zonas sísmicas o en zonas con alta humedad y corrosión, para determinar si la metodología puede aplicarse a estas situaciones. Asimismo, se podría explorar la aplicación de la metodología en otros tipos de cables, como cables submarinos o aéreos. Esta investigación podría tener implicaciones importantes para el diseño de sistemas de transmisión de energía más eficientes y confiables.
3. Validación de los resultados mediante estudios experimentales: Para garantizar la fiabilidad y precisión del modelo de optimización propuesto, sería valioso llevar a cabo estudios experimentales para validar los resultados obtenidos mediante simulaciones. Estos estudios podrían involucrar la construcción de prototipos y pruebas de campo, para evaluar el desempeño real de los cables diseñados con la metodología propuesta. Los resultados de estos estudios podrían proporcionar información valiosa para ajustar y mejorar el modelo de optimización, así como para respaldar la aplicación práctica de la metodología en el mundo real.
4. Consideración de variables adicionales: El enfoque propuesto se centra en la maximización de la ampacidad y la minimización de los costos. Sin embargo, se puede investigar cómo incluir otras variables importantes, como la inclusión de armónicos en el sistema y la vida útil, en el enfoque electro-térmico.
5. Optimización del relleno térmico: se puede investigar cómo optimizar el relleno térmico utilizado en los cables subterráneos para maximizar su capacidad de carga y prolongar su vida útil. En particular, se puede utilizar técnicas avanzadas de modelado, como las redes neuronales, para analizar la proporción de los diferentes materiales que componen el relleno térmico y su influencia en la capacidad de carga y la vida útil del cable. También se puede combinar la optimización del relleno térmico con el enfoque

multiobjetivo propuesto para obtener soluciones óptimas en términos de ampacidad, costo y vida útil.

6. Integración de técnicas termoeléctricas: se puede investigar cómo integrar técnicas termoeléctricas en la metodología propuesta para mejorar la precisión y la eficiencia del proceso de optimización. En particular, se puede explorar cómo utilizar técnicas de simulación termoeléctrica para evaluar el impacto de diferentes variables en la capacidad de carga y la vida útil de los cables subterráneos. También se puede combinar la simulación termoeléctrica con el enfoque multiobjetivo propuesto para obtener soluciones óptimas en términos de ampacidad, costo y vida útil.

Bibliografía

- [1] Paweł Ocłon. Renewable energy utilization using underground energy systems. *Lecture Notes in Energy*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75228-6>, 2021.
- [2] Thomas Worzyk. *Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [3] Ricardo Manuel Arias Velásquez and Jennifer Vanessa Mejía Lara. New methodology for design and failure analysis of underground transmission lines. *Engineering Failure Analysis*, 115:104604, 2020.
- [4] Herbert Lugschitz. Overhead lines and underground cables. In *Overhead Lines*, pages 1299–1318. Springer, 2017.
- [5] Turan Gonen. *Electrical power transmission system engineering: analysis and design*. CRC press, 2011.
- [6] Filipe Faria Da Silva and Claus Leth Bak. *Electromagnetic transients in power cables*. Springer, 2013.
- [7] George J Anders, Institute of Electrical, and Electronics Engineers. *Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment*. Wiley Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [8] Osama Gouda and Adel Farag. Bonding methods of underground cables, 10 2015.
- [9] 127/220kv copper conductor xlpe insulated corrugated aluminum sheath pvc sheath power cable. Retrieved from <https://jsdfcable.en.made-in-china.com/http://en.gznanyangcable.com/http://gzny13922732011.voip366.com/>, 2018. Accessed on April 15, 2023.
- [10] George J Anders. *Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, distribution, and industrial applications*. IEEE Piscataway, NJ, USA, 1997.

- [11] Roberto Benato, Luigi Colla, Sebastian Dambone Sessa, and Marco Marelli. Review of high current rating insulated cable solutions. *Electric Power Systems Research*, 133:36–41, 2016.
- [12] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1-1: Electric cables—calculation of the current rating—part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses—general. Tech. rep., International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2006.
- [13] ML Di Silvestre, F Massaro, L Mineo, and G Zizzo. A statistical approach of cables ageing in mv lines on thermal and electrical combined stresses. In *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.*, pages 846–851. IEEE, 2006.
- [14] Davoud Abootorabi Zarchi and Behrooz Vahidi. Optimal placement of underground cables to maximise total ampacity considering cable lifetime. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(1):263–269, 2016.
- [15] Gian Carlo Montanari. Electrical life threshold models for solid insulating materials subjected to electrical and multiple stresses. i. investigation and comparison of life models. *IEEE transactions on electrical insulation*, 27(5):974–986, 1992.
- [16] Hamed Shabani and Behrooz Vahidi. Co-optimization of ampacity and lifetime with considering harmonic and stochastic parameters by imperialist competition algorithm. *Applied Soft Computing*, 96:106599, 2020.
- [17] MA El-Kady. Optimization of power cable and thermal backfill configurations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (12):4681–4688, 1982.
- [18] Hamed Shabani and Behrooz Vahidi. A probabilistic approach for optimal power cable ampacity computation by considering uncertainty of parameters and economic constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106:432–443, 2019.
- [19] Bojan D Perović, Dragan S Tasić, Dardan O Klimenta, Jordan N Radosavljević, Miroljub D Jevtić, and Miloš J Milovanović. Optimising the thermal environment and

- the ampacity of underground power cables using the gravitational search algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(2):423–430, 2018.
- [20] Douglas C Montgomery and George C Runger. *Applied statistics and probability for engineers*. John wiley & sons, 2020.
- [21] Paweł Ocłoń, Piotr Cisek, Marcin Pilarczyk, and Dawid Taler. Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil. *Energy Conversion and Management*, 95:352–370, 2015.
- [22] Andrzej Cichy, Bartosz Sakowicz, and Marek Kaminski. Economic optimization of an underground power cable installation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(3):1124–1133, 2017.
- [23] Paweł Ocłoń. The effect of soil thermal conductivity and cable ampacity on the thermal performance and material costs of underground transmission line. *Energy*, 231:120803, 2021.
- [24] Paweł Ocłoń, Piotr Cisek, Monika Rerak, Dawid Taler, R Venkata Rao, Andrea Vallati, and Marcin Pilarczyk. Thermal performance optimization of the underground power cable system by using a modified jaya algorithm. *International Journal of Thermal Sciences*, 123:162–180, 2018.
- [25] Steve A Fenrick and Lullit Getachew. Cost and reliability comparisons of underground and overhead power lines. *Utilities Policy*, 20(1):31–37, 2012.
- [26] Zhong Zhang, Pascal Dieu Seul Assala, and Lihao Wu. Residual life assessment of 110 kv xlpe cable. *Electric Power Systems Research*, 163:572–580, 2018.
- [27] Kwonchul Kim, Youngjae Kim, Beopsoo Kim, and Insu Kim. A study on optimizing underground cable maintenance and replacement cycles. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(4):2015–2023, 2022.
- [28] International Energy Agency. Global energy review 2020. En línea, 2020.
- [29] Osinergmin. Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación. División de Supervisión de Electricidad, 2019.

- [30] ISA. Línea de transmisión 220 kv la planicie – industriales y subestaciones asociadas. <http://contenido.coes.org.pe/alfrescostruts/download.do?nodeId=bf73e630-ac1f-4035-9294-5a9322977b28>, enero 2017.
- [31] MS Foyt, GJ Anders, and SC Croall. Cable environment analysis and the probabilistic approach to cable rating. *IEEE transactions on power delivery*, 5(3):1628–1633, 1990.
- [32] Kary E Saleeby, WZ Black, and JG Hartley. Effective thermal resistivity for power cables buried in thermal backfill. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (6):2201–2214, 1979.
- [33] Wael Moutassem and George J Anders. Configuration optimization of underground cables for best ampacity. *IEEE transactions on power delivery*, 25(4):2037–2045, 2010.
- [34] Stanislaw Czapp and Filip Ratkowski. Optimization of thermal backfill configurations for desired high-voltage power cables ampacity. *Energies*, 14(5):1452, 2021.
- [35] Francisco De León. Major factors affecting cable ampacity. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pages 6–pp. IEEE, 2006.
- [36] F. De Leon. *Calculation of underground cable ampacity*. The Electricity Forum, 2005.
- [37] MS Al-Saud, MA El-Kady, and RD Findlay. A new approach to underground cable performance assessment. *Electric Power Systems Research*, 78(5):907–918, 2008.
- [38] IA Metwally, AH Al-Badi, and AS Al Farsi. Factors influencing ampacity and temperature of underground power cables. *Electrical Engineering*, 95:383–392, 2013.
- [39] Bojan D Perović, Dardan O Klimenta, Jordan N Radosavljević, and Miroljub D Jevtić. Optimizing of the cable bedding and the ampacity of underground power cables in trefoil formation by using the gravitational search algorithm. *Tehnika*, 71(3):431–438, 2016.
- [40] Paweł Ocłoń, Marco Bittelli, Piotr Cisek, Eva Kroener, Marcin Pilarczyk, Dawid Taler, Ravipudi Venkata Rao, and Andrea Vallati. The performance analysis of a new thermal backfill material for underground power cable system. *Applied Thermal Engineering*, 108:233–250, 2016.

- [41] Dardan Klimenta, Dragan Tasić, and Miroljub Jevtić. The use of hydronic asphalt pavements as an alternative method of eliminating hot spots of underground power cables. *Applied Thermal Engineering*, 168:114818, 2020.
- [42] Andrzej Cichy, Bartosz Sakowicz, and Marek Kaminski. Detailed model for calculation of life-cycle cost of cable ownership and comparison with the iec formula. *Electric Power Systems Research*, 154:463–473, 2018.
- [43] Bin Sun and Elham Makram. Configuration optimization of cables in ductbank based on their ampacity. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(4):1–15, 2018.
- [44] Bojan Perović, Dardan Klimenta, Dragan Tasić, Nebojša Raičević, Miloš Milovanović, Milan Tomović, and Jovan Vukašinović. Increasing the ampacity of underground cable lines by optimising the thermal environment and design parameters for cable crossings. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(11):2309–2318, 2022.
- [45] Davoud Abootorabi Zarchi and Behrooz Vahidi. Multi objective self adaptive optimization method to maximize ampacity and minimize cost of underground cables. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(4):401–408, 2018.
- [46] Jian Wang, Bin Liu, Danyu Li, Xiao Ma, Bin Zhao, and Zhi Yang. Research on optimal placement methodology of power cable in ductbank. *Energy Reports*, 9:46–57, 2023.
- [47] Paweł Ocłoń, Monika Rerak, Ravipudi Venkata Rao, Piotr Cisek, Andrea Vallati, Dariusz Jakubek, and Bartosz Rozegnał. Multiobjective optimization of underground power cable systems. *Energy*, 215:119089, 2021.
- [48] MA El-Cady, H Radhakrishna, DJ Horrocks, and R Ganton. A probabilistic approach to power cable thermal analysis and ampacity calculation. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1984.
- [49] HC Zhao, JS Lyall, and Ghavam Nourbakhsh. Probabilistic cable rating based on cable thermal environment studying. In *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 00EX409)*, volume 2, pages 1071–1076. IEEE, 2000.

- [50] GJ Anders, M Vainberg, DJ Horrocks, SM Foyt, J Motlis, and J Jarnicki. Parameters affecting economic selection of cable sizes. *IEEE Transactions on power delivery*, 8(4):1661–1667, 1993.
- [51] Paweł Ocłoń. Optimization of underground power cable systems. In *Renewable Energy Utilization Using Underground Energy Systems*, pages 141–170. Springer, 2021.
- [52] Paweł Ocłoń, Piotr Cisek, Dawid Taler, Marcin Pilarczyk, and Tomasz Szwarc. Optimizing of the underground power cable bedding using momentum-type particle swarm optimization method. *Energy*, 92:230–239, 2015.
- [53] Ahmadreza Jamali-Abnavi and Hamed Hashemi-Dezaki. Harmonic-based expected life estimation of electric arc furnace’s high voltage polymeric insulated cables based on electro-thermal stresses considering sheath bonding methods and transient overvoltages. *Electric Power Systems Research*, 204:107699, 2022.
- [54] MA El-Kady. Calculation of the sensitivity of power cable ampacity to variations of design and environmental parameters. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (8):2043–2050, 1984.
- [55] F Selim, Almoataz Y Abdelaziz, Ibrahim BM Taha, and Mohamed I Abdelwanis. A probabilistic approach for power cable cross section area selection: Most economic design by computer aided. *Heliyon*, 8(12):e12049, 2022.
- [56] Thomas Allen Short. *Electric power distribution equipment and systems*. CRC press, 2018.
- [57] Dongxin He, Jiefeng Gu, Wei Wang, Shiyuan Liu, Shu Song, and Denghui Yi. Research on mechanical and dielectric properties of xlpe cable under accelerated electrical-thermal aging. *Polymers for Advanced Technologies*, 28(8):1020–1029, 2017.
- [58] Turan Gonen. Electric power transmission system engineering: Analysis and design. *John Wiley Sons, Inc., USA*, 2009.
- [59] William A Thue. *Electrical power cable engineering*. Crc Press, 2017.
- [60] Jianying Li, Kai Yang, Kangning Wu, Zhenghong Jing, and Jin-Yong Dong. Eco-friendly polypropylene power cable insulation: Present status and perspective. *IET Nanodielectrics*, 2023.

- [61] BX Du, Chenlei Han, Zhonglei Li, and Jin Li. Effect of graphene oxide particles on space charge accumulation in ldpe/go nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(4):1479–1486, 2018.
- [62] George Anders and Heinrich Brakelmann. Cable crossings-derating considerations. i. derivation of derating equations. *IEEE transactions on power delivery*, 14(3):709–714, 1999.
- [63] Heinrich Brakelmann and George J Anders. Analysis of the three-dimensional temperature distribution of forced cooled power cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(2):736–744, 2021.
- [64] EH Ball, JD Endacott, and DJ Skipper. Uk requirements and future prospects for forced-cooled cable systems. *Proc. Inst. Electr. Eng. (London); (United Kingdom)*, 124(3), 1977.
- [65] Torben Aabo, W Graham Lawson, and Sunil V Pancholi. Upgrading the ampacity of hpff pipe-type cable circuits. In *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, pages 473–479. IEEE, 1994.
- [66] Nazar Hussain Malik, AA Al-Arainy, and Mohammad Iqbal Qureshi. *Electrical insulation in power systems*. CRC Press, 2018.
- [67] M Abdel, A El-Morshey, and R Radwan. Highvoltage engineering: theory and practice.“. *Electrical Engineering and Electronics*”. Second Edition. Ed. Taylor & Francis. New York, pages 350–356, 2000.
- [68] Sushil Kumar Ganguli and Vivek Kohli. *Power cable technology*. CRC Press, 2016.
- [69] International Electrotechnical Commission. *IEC 60287-2-1. Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance*. International Electrotechnical Commission, 3rd edition, 2015.
- [70] IEEE Power Engineering Society. *IEEE standard power cable ampacity tables*. IEEE, ieee std 835-1994 edition, 1994.
- [71] JH Neher and MH McGrath. The calculation or the temperature rise and load capability of cable systems. *RATIO*, 50(2):5, 1994.

- [72] Theodore L Bergman, Theodore L Bergman, Frank P Incropera, David P Dewitt, and Adrienne S Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [73] S.A. Boggs, F.Y. Chu, H.S. Radhakrishna, and J.E. Steinmanis, editors. *Proceedings of the Symposium on Underground Cable Thermal Backfill, Held in Toronto, Canada, September 17 and 18, 1981*. Butterworth-Heinemann, 1982.
- [74] Francisco De Leon. *Calculation of underground cable ampacity*, volume 1. The Electricity Forum, 2005.
- [75] Md Abdus Salam. *Fundamentals of electrical power systems analysis*. Springer, 2020.
- [76] FC Van Wormer. An improved approximate technique for calculating cable temperature transients [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 74(3):277–281, 1955.
- [77] Markus Heggås. Modelling natural convection, radiation and conduction heat transfer of installed power cables. 2018.
- [78] Qiang Tong, Jianping Qi, Yanling Wang, Likai Liang, Xiangxing Meng, and Qiang Zhang. Power cable ampacity and influential factors analysis under operation. *Journal of Information Processing Systems*, 14(5):1136–1149, 2018.
- [79] RL Jackson. Eddy-current losses in unbonded tubes. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, volume 122, pages 551–557. IET, 1975.
- [80] Francisco De Leon and George J Anders. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2):537–543, 2008.
- [81] Jay A Williams, Deepak Parmar, and Mark W Conroy. Controlled backfill optimization to achieve high ampacities on transmission cables. *IEEE transactions on power delivery*, 9(1):544–552, 1994.
- [82] HS Radhakrishna. Fluidized cable thermal backfill. In *Underground cable thermal backfill*, pages 34–53. Elsevier, 1982.

- [83] MA El-Kady and DJ Horrocks. Extended values for geometric factor of external thermal resistance of cables in duct banks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (8):1958–1962, 1985.
- [84] Sally M Sellers and WZ Black. Refinements to the neher-mcgrath model for calculating the ampacity of underground cables. *Ieee transactions on power delivery*, 11(1):12–30, 1996.
- [85] Leon Ramirez and George J Anders. Cables in backfills and duct banks—neher/mcgrath revisited. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(4):1974–1981, 2020.
- [86] Sudhakar Cherukupalli and George J Anders. Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables. 2019.
- [87] Faruk Aras, Vilayet Alekperov, Nursel Can, and Hulya Kirkici. Aging of 154 kv underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 23(5):25–33, 2007.
- [88] Chinh Dang, J-L Parpal, and J-P Crine. Electrical aging of extruded dielectric cables: review of existing theories and data. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 3(2):237–247, 1996.
- [89] G Bahder, T Garrity, M Sosnowski, R Eaton, and C Katz. Physical model of electric aging and breakdown of extruded ppolymeric insulated power cables. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (6):1379–1390, 1982.
- [90] Gian Carlo Montanari and Luciano Simoni. Aging phenomenology and modeling. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 28(5):755–776, 1993.
- [91] Farouk AM Rizk and Giao N Trinh. *High voltage engineering*. CRC Press, 2018.
- [92] P Cygan and JR Laghari. Models for insulation aging under electrical and thermal multistress. *IEEE transactions on electrical insulation*, 25(5):923–934, 1990.
- [93] GC Montanari, G Mazzanti, and L Simoni. Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9(5):730–745, 2002.

- [94] Giovanni Mazzanti. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(4):1168–1179, 2009.
- [95] YJ Han, HM Lee, and Y-J Shin. Thermal aging estimation with load cycle and thermal transients for xlpe-insulated underground cable. In *2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, pages 205–208. IEEE, 2017.
- [96] M Rasoulpoor, M Mirzaie, and SM Mirimani. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle. *Applied Thermal Engineering*, 123:353–364, 2017.
- [97] G Mazzanti and GC Montanari. A comparison between xlpe and epr as insulating materials for hv cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1):15–28, 1997.
- [98] Mario Cacciari and GC Montanari. Optimum design of life tests for insulating materials, systems and components. *IEEE transactions on electrical insulation*, 26(6):1112–1123, 1991.
- [99] Ali Kaveh and Taha Bakhshpoori. Metaheuristics: outlines, matlab codes and examples. 2019.
- [100] Arunachalam Ravindran, Gintaras Victor Reklaitis, and Kenneth Martin Ragsdell. *Engineering optimization: methods and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [101] Harish Garg. A hybrid gsa-ga algorithm for constrained optimization problems. *Information Sciences*, 478:499–523, 2019.
- [102] Mehak Kohli and Sankalap Arora. Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems. *Journal of computational design and engineering*, 5(4):458–472, 2018.
- [103] Kalyanmoy Deb. *Optimization for engineering design: Algorithms and examples*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- [104] Kalyanmoy Deb. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 186(2-4):311–338, 2000.

- [105] Patrick Ngatchou, Anahita Zarei, and A El-Sharkawi. Pareto multi objective optimization. In *Proceedings of the 13th international conference on, intelligent systems application to power systems*, pages 84–91. IEEE, 2005.
- [106] Yann Collette and Patrick Siarry. *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [107] Ke-Lin Du, MNS Swamy, et al. Search and optimization by metaheuristics. *Techniques and Algorithms Inspired by Nature*, pages 1–10, 2016.
- [108] Carlos A Coello Coello, Gary B Lamont, David A Van Veldhuizen, et al. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, volume 5. Springer, 2007.
- [109] Kalyanmoy Deb. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, volume 16. John Wiley & Sons, 2001.
- [110] Kaisa Miettinen. *Nonlinear multiobjective optimization*, volume 12. Springer Science & Business Media, 1999.
- [111] Jurgen Branke, Jürgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen, and Roman Slowiński. *Multiobjective optimization: Interactive and evolutionary approaches*, volume 5252. Springer Science & Business Media, 2008.
- [112] Hui Liu, Ye Li, Zhu Duan, and Chao Chen. A review on multi-objective optimization framework in wind energy forecasting techniques and applications. *Energy Conversion and Management*, 224:113324, 2020.
- [113] Son Duy Dao. A note on the popularity of stochastic optimization algorithms in different fields: A quantitative analysis from 2007 to 2017. *arXiv preprint arXiv:1907.01453*, 2019.
- [114] Chi-Kong Ng and Duan Li. Test problem generator for unconstrained global optimization. *Computers & operations research*, 51:338–349, 2014.
- [115] Vijay Hanagandi and Michael Nikolaou. A hybrid approach to global optimization using a clustering algorithm in a genetic search framework. *Computers & chemical engineering*, 22(12):1913–1925, 1998.

- [116] Son Duy Dao, Kazem Abhary, and Romeo Marian. An adaptive restarting genetic algorithm for global optimization. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, volume 1, 2015.
- [117] Leo Liberti and Sergei Kucherenko. Comparison of deterministic and stochastic approaches to global optimization. *International Transactions in Operational Research*, 12(3):263–285, 2005.
- [118] Carmen G Moles, Pedro Mendes, and Julio R Banga. Parameter estimation in biochemical pathways: a comparison of global optimization methods. *Genome research*, 13(11):2467–2474, 2003.
- [119] C Guus, E Boender, and H Romeijn. Stochastic methods, 624 in: R. horst, pm pardalos (eds.), handbook of global optimization, 1995.
- [120] Jorge Nocedal Stephen J Wright. Numerical optimization, 2006.
- [121] Abdelkhalak El Hami and Bouchaïb Radi. *Optimizations and programming: linear, non-linear, dynamic, stochastic and applications with Matlab*. John Wiley & Sons, 2021.
- [122] Lorenz T Biegler. *Nonlinear programming: concepts, algorithms, and applications to chemical processes*. SIAM, 2010.
- [123] Roger Fletcher and Sven Leyffer. Nonlinear programming without a penalty function. *Mathematical programming*, 91:239–269, 2002.
- [124] A Nareyek. Constraints-based agents—an architecture for constraint-based modeling and local-search-based reasoning for planning and scheduling in open and dynamic worlds, 2001.
- [125] Roger Ghanem, David Higdon, Houman Owhadi, et al. *Handbook of uncertainty quantification*, volume 6. Springer, 2017.
- [126] Son Duy Dao. *Modelling and intelligent optimisation of production scheduling in VCIM systems*. Springer, 2017.
- [127] Urmila Diwekar and Amy David. *BONUS algorithm for large scale stochastic nonlinear programming problems*. Springer, 2015.

- [128] Mahamad Nabab Alam, Biswarup Das, and Vinay Pant. A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination. *Electric Power Systems Research*, 128:39–52, 2015.
- [129] Mahamad Nabab Alam. Particle swarm optimization: Algorithm and its codes in matlab. *ResearchGate*, 8(1):10, 2016.
- [130] Xin-She Yang, Gebrail Bekdaş, and Sinan Melih Nigdeli. *Metaheuristics and optimization in civil engineering*. Springer, 2016.
- [131] XD Wang, Charles Hirsch, Sh Kang, and Christian Lacor. Multi-objective optimization of turbomachinery using improved nsga-ii and approximation model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(9-12):883–895, 2011.
- [132] Lei Quan, Chenzhao Fu, Wenrong Si, Jian Yang, and Qiuwang Wang. Numerical study of heat transfer in underground power cable system. *Energy Procedia*, 158:5317–5322, 2019.
- [133] Dardan Klimenta, Dragan Tasić, Bojan Perović, Jelena Klimenta, Miloš Milovanović, and Ljiljana Andđelković. Eliminating the effect of hot spots on underground power cables using cool pavements. *Electrical Engineering*, 101:1295–1309, 2019.
- [134] Roberto Benato and Antonio Paolucci. Multiconductor cell analysis of skin effect in milliken type cables. *Electric power systems research*, 90:99–106, 2012.
- [135] René Suchantke. *Alternating current loss measurement of power cable conductors with large cross sections using electrical methods*. Technische Universitaet Berlin (Germany), 2018.
- [136] N Kovac, GJ Anders, and D Poljak. An improved formula for external thermal resistance of three buried single-core metal-sheathed touching cables in flat formation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1(24):3–11, 2009.
- [137] Dardan Klimenta, Bojan Perović, Jelena Klimenta, Milena Jevtić, Miloš Milovanović, and Ivan Krstić. Modelling the thermal effect of solar radiation on the ampacity of a low voltage underground cable. *International Journal of Thermal Sciences*, 134:507–516, 2018.

- [138] P Victer Paul, N Moganarangan, S Sampath Kumar, R Raju, T Vengattaraman, and P Dhavachelvan. Performance analyses over population seeding techniques of the permutation-coded genetic algorithm: An empirical study based on traveling salesman problems. *Applied soft computing*, 32:383–402, 2015.
- [139] Romeo Marin Marian, Lee Luong, and Son Duy Dao. *Hybrid genetic algorithm optimisation of distribution networks—A comparative study*. Springer, 2012.
- [140] Mohsen Shahlaei, Armin Madadkar-Sobhani, Lotfollah Saghaie, and Afshin Fassihi. Application of an expert system based on genetic algorithm–adaptive neuro-fuzzy inference system (ga–anfis) in qsar of cathepsin k inhibitors. *Expert Systems with Applications*, 39(6):6182–6191, 2012.
- [141] Behnam Fahimnia, Lee Luong, Romeo Marian, et al. Optimization/simulation modeling of the integrated production-distribution plan: an innovative survey. 2008.
- [142] Ming-Hua Lin and Jung-Fa Tsai. Finding multiple optimal solutions of signomial discrete programming problems with free variables. *Optimization and Engineering*, 12:425–443, 2011.
- [143] Mitsuo Gen and Runwei Cheng. *Genetic algorithms and engineering optimization*, volume 7. John Wiley & Sons, 1999.
- [144] Rafael Martí, Mauricio GC Resende, and Celso C Ribeiro. Multi-start methods for combinatorial optimization. *European Journal of Operational Research*, 226(1):1–8, 2013.
- [145] Yacine Kessaci, Mohand Mezmaz, Nouredine Melab, El-Ghazali Talbi, and Daniel Tuyttens. Parallel evolutionary algorithms for energy aware scheduling. *Intelligent decision systems in large-scale distributed environments*, pages 75–100, 2011.
- [146] Son Duy Dao, Kazem Abhary, and Romeo Marian. Optimisation of partner selection and collaborative transportation scheduling in virtual enterprises using ga. *Expert Systems with Applications*, 41(15):6701–6717, 2014.
- [147] David Beasley, David R Bull, and Ralph R Martin. A sequential niche technique for multimodal function optimization. *Evolutionary computation*, 1(2):101–125, 1993.

- [148] Son Duy Dao, Kazem Abhary, and Romeo Marian. An improved structure of genetic algorithms for global optimisation. *Progress in Artificial Intelligence*, 5:155–163, 2016.
- [149] Son Duy Dao, Kazem Abhary, and Romeo Marian. An innovative framework for designing genetic algorithm structures. *Expert Systems with Applications*, 90:196–208, 2017.
- [150] Biruk Tessema and Gary G Yen. A self adaptive penalty function based algorithm for constrained optimization. In *2006 IEEE international conference on evolutionary computation*, pages 246–253. IEEE, 2006.
- [151] Helio JC Barbosa and Afonso CC Lemonge. An adaptive penalty scheme in genetic algorithms for constrained optimization problems. In *Proceedings of the 4th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pages 287–294, 2002.
- [152] Zhe Li, Ling Zheng, Yue Ren, Yinong Li, and Zhoubing Xiong. Multi-objective optimization of active suspension system in electric vehicle with in-wheel-motor against the negative electromechanical coupling effects. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116:545–565, 2019.
- [153] Berkan Hizarci and Zeki Kiral. Experimental investigation of vibration attenuation on a cantilever beam using air-jet pulses with the particle swarm optimized quasi bang–bang controller. *Journal of Vibration and Control*, 28(1-2):58–71, 2022.
- [154] James Kennedy and Russell Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN’95-international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. IEEE, 1995.
- [155] Boehner Kirsten, Depaula Rogerio Rogerio, Dourish Paul, and Sengers Phoebe. How emotion is made and measured. *Int. J. Human-Computer Studies*, 65:275–291, 2007.
- [156] Modestus O Okwu and Lagouge K Tartibu. *Metaheuristic optimization: Nature-inspired algorithms swarm and computational intelligence, theory and applications*, volume 927. Springer Nature, 2020.
- [157] Talaka Dya, Bale Baidi Blaise, Gambo Betchewe, and Mohamadou Alidou. Implementation of particle swarm optimization algorithm in matlab code for hyperelastic characterization. *World Journal of Mechanics*, 11(7):146–163, 2021.

- [158] MGK Machesa, LK Tartibu, FK Tekweme, and MO Okwu. Evaluation of the stirling heat engine performance prediction using ann-pso and anfis models. In *2019 6th International conference on soft computing & machine intelligence (ISCMCI)*, pages 217–222. IEEE, 2019.
- [159] Yuhui Shi and Russell Eberhart. A modified particle swarm optimizer. In *1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360)*, pages 69–73. IEEE, 1998.
- [160] Amin Bemani, Qingang Xiong, Alireza Baghban, Sajjad Habibzadeh, Amir H Mohammadi, and Mohammad Hossein Doranehgard. Modeling of cetane number of biodiesel from fatty acid methyl ester (fame) information using ga-, pso-, and hgapsolssvm models. *Renewable Energy*, 150:924–934, 2020.
- [161] Harish Garg. A hybrid pso-ga algorithm for constrained optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 274:292–305, 2016.
- [162] R Timothy Marler and Jasbir S Arora. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization*, 41:853–862, 2010.
- [163] Anwr Mohammed Albaghadi, Masri Bin Baharom, and Shaharin Anwar bin Sulaiman. Parameter design optimization of the crank-rocker engine using the fmincon function in matlab. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 1088, page 012072. IOP Publishing, 2021.
- [164] R Timothy Marler and Jasbir S Arora. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26:369–395, 2004.
- [165] Taiming Huang, Wei Wang, Yao Yuan, Jie Huang, Xi Chen, Jing Zhang, Xiangzhong Kong, Yan Zhang, and Zhongmin Wan. Optimization of high-temperature proton exchange membrane fuel cell flow channel based on genetic algorithm. *Energy Reports*, 7:1374–1384, 2021.
- [166] Nadia Nedjah and Luiza de Macedo Mourelle. Evolutionary multi-objective optimisation: A survey. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 7(1):1–25, 2015.

- [167] Alexandru Woinaroschy. Multiobjective optimal design for biodiesel sustainable production. *Fuel*, 135:393–405, 2014.
- [168] Varun Punnathanam and Prakash Kotecha. Multi-objective optimization of stirling engine systems using front-based yin-yang-pair optimization. *Energy Conversion and Management*, 133:332–348, 2017.
- [169] Laura Velásquez, Alejandro Posada, and Edwin Chica. Surrogate modeling method for multi-objective optimization of the inlet channel and the basin of a gravitational water vortex hydraulic turbine. *Applied Energy*, 330:120357, 2023.
- [170] Ziyin He, Hui Hou, Tingting Hou, Rengcun Fang, Jinrui Tang, and Changjun Xie. Multi-objective optimization for improving ev users' adhesion with hybrid demand response strategy. *Energy Reports*, 9:316–322, 2023.
- [171] Diogo R Fragoso, Aires dos Santos, and Edgar C Fernandes. Increasing res penetration through h2 technologies on flores island, azores: A techno-economic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(52):19846–19861, 2023.
- [172] Mohammad Hemmat Esfe, Hadi Hajmohammad, Reza Moradi, and Ali Akbar Abbasian Arani. Multi-objective optimization of cost and thermal performance of double walled carbon nanotubes/water nanofluids by nsga-ii using response surface method. *Applied Thermal Engineering*, 112:1648–1657, 2017.
- [173] Yunguang Ji, Zhikuo Yang, Jingyu Ran, and Hongtao Li. Multi-objective parameter optimization of turbine impeller based on rbf neural network and nsga-ii genetic algorithm. *Energy Reports*, 7:584–593, 2021.
- [174] Yilin Liu, John C Chai, Xin Cui, Weichao Yan, Na Li, and Liwen Jin. Multi-objective optimization of air dehumidification membrane module based on response surface method and genetic algorithm. *Energy Reports*, 9:2201–2212, 2023.
- [175] L Simoni, G Mazzanti, GC Montanari, and L Lefebvre. A general multi-stress life model for insulating materials with or without evidence for thresholds. *IEEE transactions on electrical insulation*, 28(3):349–364, 1993.
- [176] L Simoni, G Mazzanti, and GC Montanari. Life models for insulating materials in combined-stress conditions. In *Proceedings of 1994 4th International Conference on*

Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), volume 2, pages 827–832. IEEE, 1994.

- [177] Davoud Abootorabi Zarchi, Behrooz Vahidi, and Moosa Moghimi Haji. Optimal configuration of underground cables to maximise total ampacity considering current harmonics. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(6):1090–1097, 2014.
- [178] Gary L Ford and Janis E Steinmanis. The importance of weather dependent processes on underground cable design. In *Underground Cable Thermal Backfill*, pages 157–166. Elsevier, 1982.

Apéndice A

Cálculo de Parámetros del Cable

A.1 Resistencia DC del Conductor y la Cubierta

Es importante observar que las resistencias del conductor y la cubierta pueden tener ligeras variaciones en el cable debido a que la cubierta y otros componentes externos al conductor central operan a una temperatura ligeramente más baja. Según la referencia [16], las temperaturas promedio del conductor, el aislamiento, la cubierta corrugada de aluminio y la superficie del cable son de 87 °C, 78 °C, 77 °C y 75.4 °C, respectivamente.

En un sistema de tendido de tres cables en formación plana, los cálculos se enfocan en el cable del medio debido a su posición, lo que resulta en una capacidad de disipación de calor menor. Esto podría ocasionar temperaturas más altas en el cable del medio en comparación con los cables laterales. La ampacidad del cable del medio se determina en el escenario más desfavorable para garantizar su capacidad de manejar la corriente de manera segura. La resistencia del conductor de cobre a 20 °C fue proporcionada por el fabricante y tiene un valor de:

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}}{S} = 9 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$$

La resistencia DC del conductor Milliken a 90 °C se calcula con la ecuación (2.15):

$$R_{dc} = 9 \times 10^{-6} \cdot [1 + 3.93 \times 10^{-3} \cdot (90 - 20)] = 1.14759 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

Para calcular la resistencia DC de la cubierta corrugada de aluminio, se determina el diámetro medio de la cubierta sólida con la ecuación (2.36). Dados el diámetro externo del cable central (D_{oc}) de 142.7 mm, el diámetro interno del cable central (D_{it}) de 110.3 mm y el espesor de la funda (t_s) de 2.8 mm, se obtiene:

$$d = \frac{(D_{oc} + D_{it})}{2} = \frac{142.7 + 110.3}{2} = 126.5 \text{ mm}$$

Asumiendo una temperatura de operación de la cubierta de 83 °C, la resistencia de la cubierta se calcula mediante

$$R_{s0} = \frac{\rho_{20}}{\pi \cdot d \cdot t_s} = \frac{2.8264 \times 10^{-8}}{\pi \cdot 126.5 \cdot 2.8 \cdot 10^{-6}} = 2.54 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] = 3.749 \times 10^{-5} [1 + 0.00403(83 - 20)] = 3.1849 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$$

A.2 Factor de pérdida por corrientes de Foucault

La relación frecuencia-resistencia se describe en la ecuación (2.45) y se calcula mediante la fórmula:

$$m = \frac{(\mu \cdot \mu_0 \cdot \omega)}{(4\pi \cdot R_s)} = \frac{(1)(4\pi \cdot 10^{-7})(2\pi \cdot 60)}{(4\pi \cdot (3.1849 \cdot 10^{-5}))} = 1.18369$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi \cdot \omega}{10^7 \cdot \rho_s}} = \sqrt{\frac{(4\pi \cdot 2\pi \cdot 60)}{(10^7 \cdot 2.8264 \cdot 10^{-8}[1 + 0.00403(83 - 20)])}} = 115.618$$

El factor de corrección para vainas gruesas se determina mediante la ecuación (2.44), que en este caso resulta en

$$g_s = 1 + \left(\frac{2.8}{0.1293}\right)^{1.74} (115.618 \times 0.1293 \times 10^{-3} - 1.6) = 0.998 \quad (\text{A.1})$$

Finalmente, se pueden utilizar las ecuaciones aproximadas (2.45, 2.46 y 2.47) para calcular el factor de pérdida por corrientes de Foucault.

A.3 Resistencias térmicas

Primero, se procede al cálculo de las resistencias térmicas. Las resistividades térmicas utilizadas son las siguientes:

- Resistividad del aislamiento (XLPE y PE de alta densidad): 3.5 K.m/W [2, 10].
- Las resistividades térmicas del polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y el polietileno lineal de alta densidad (HDPE) pueden variar según el fabricante. En este estudio, se ha considerado una resistividad de 3.5, K.m/W para el LLDPE.

Con estos valores se calculan las resistencias térmicas T_1 y T_2 , utilizando las ecuaciones (2.48) y (2.49), respectivamente:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_i}{d_c} \right) = \frac{3.5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \times 24}{55.2} \right) \approx 0.3519 \text{ K.m/W} \quad (\text{A.2})$$

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_{ce}}{d_{ce}} \right) = \frac{3.5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \times 5}{60.1} \right) \approx 0.0816 \text{ K.m/W} \quad (\text{A.3})$$

A.4 Pérdidas dieléctricas

La capacitancia para conductores circulares está dada por (2.28) y la pérdida dieléctrica por unidad de longitud en cada fase viene dada por la ecuación (2.30):

$$C = \frac{\varepsilon_{ais}}{18 \ln(D_{ci}/d_i) \times 10^{-9}} = \frac{2.3}{18 \ln(110.3/54.5) \times 10^{-9}} \approx 4.0518 \times 10^{-10} \text{ F/m} \quad (\text{A.4})$$

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta = 2\pi \times 60 \times (4.054 \times 10^{-10}) \times (220 \times 10^3)^2 \times 0.001 \approx 2.4644 \text{ W/m} \quad (\text{A.5})$$

La tensión nominal (U_0) fase a fase en el sistema de transformador triángulo es de 220 kV. En un sistema trifásico equilibrado, como en el caso de una formación plana de tres cables equidistantes, no es necesario dividir la tensión entre la raíz de 3, ya que las tensiones entre cada par de fases son iguales.

Apéndice B

Códigos de Optimización en MATLAB

B.1 AG con Reinicio Adaptativo y Búsqueda Local

```
1 function I = ObjectiveFunction(x)
2     % Variables de diseño
3     L = x(1); LG = x(2); W = x(3); s = x(5); s1 = x(6);
4     % Parámetros constantes
5     De = 147.7 * 10^(-3); % Diámetro exterior del cable (m)
6     R20 = 0.0090 * 10^(-3); % Resistencia del conductor a 20 °C
7     a20 = 3.93 * 10^(-3); % Coeficiente de temperatura del cobre
8     b20 = 4.03 * 10^(-3); % Coeficiente de temperatura del aluminio
9     fHz = 60; % Frecuencia fundamental
10    dc = 54.5 * 10^(-3); % Diámetro del conductor (m)
11    tcs = 2 * 10^(-3); % Cinta Semiconductora (m)
12    tpc = 2 * 10^(-3); % Pantalla del Conductor
13    ti = 24 * 10^(-3); % Espesor del aislamiento (m)
14    tpa = 1.2 * 10^(-3); % Pantalla del aislamiento (m)
15    tcsb = 2 * 10^(-3); % Cinta Semicond. de Bloqueo de Agua (m)
16    ts = 2.8 * 10^(-3); % Espesor de la Cubierta Corrugada (m)
17    tcb = 2 * 10^(-3); % Cinta Bituminosa Anticorrosiva
18    tce = 5 * 10^(-3); % Espesor de la cubierta exterior (m)
19    dce = 2*((dc)/2)+tcs+tpc+ti+tpa+tcsb+ts+tcb+tce;
20    Di = 2 * (((dc)/2) + tcs + tpc + ti);
21    d = 2 * (((dc)/2) + tcs + tpc + ti + tpa + (tcsb/2));
22    Ds = d + ts; % Diámetro exterior equivalente
23    Ta = 25; % Temperatura ambiente (°C)
24    pr = 0.5; % Resistividad del relleno
25    ps = 2.5; % Resistividad térmica del suelo
```

```

26 Tc = 90; % Temperatura máxima del conductor
27 ks = 0.435; % Factor de efecto piel
28 kp = 0.378; % Factor de efecto proximidad
29 p20 = 2.8264 * 10^(-8); % Resistividad eléctrica a 20 °C del Al
30 p20Cu = 1.7264 * 10^(-8); % Resistividad a 20 °C del Cu
31 Tsc = 90; % Temperatura del conductor de Al corrugado
32 PT1 = 3.5; % Resistividad del aislamiento
33 PT2 = 3.5; % Resistividad térmicas LLDPE
34 TgA = 0.001; % Factor de disipación del aislamiento
35 U0 = 220 * 10^(3); % Tensión nominal fase a fase
36 Eais = 2.3; % Permitividad dieléctrica del aisl.(F/m)

37
38 % Resistencia de CA del cable y Resistencia de la cubierta
39 Rdc = R20*(1 + a20*(Tc - 20)); % Resistencia dc del conductor
40 xs = sqrt((8*pi*fHz*ks)*(10^(-7))/Rdc); % 0 < xs <= 2.8
41 ys = (xs^4) / (192 + 0.8 * (xs^4));
42 xp = sqrt((8*pi*fHz * kp)*(10^(-7)) / Rdc); % xp <= 2.8
43 Fp = (xp^4) / (192 + 0.8 * (xp^4));
44 yp = Fp*((dc/s)^2) * (0.312*((dc/s)^2) + (1.18/(Fp + 0.27)));
45 Rac = Rdc * (1 + ys + yp); % Resistencia AC del conductor
46 Rs = (p20/(pi*d*ts)) * (1 + b20 * (Tsc - 20)); % cubierta

47
48 % Factores de pérdida de la cubierta
49 w = 2 * pi * fHz; % Frecuencia angular
50 XX = 2 * w * (10^(-7)) * log((2 * s) / d); % La reactancia
51 Xm = 2 * w * (10^(-7)) * log(2); % Reactancia mutua del cable
52 X1 = 2 * w * (10^(-7)) * log(2 * (2^(1/3)) * (s / d));
53 L1sa = (Rs / Rac) * (1 / (1 + (Rs / X1)^2)); % Corr. circulantes

54
55 % Pérdida de potencia en la cubierta por corrientes de Foucault
56 pt = p20*(1 + b20*(Tsc - 20)); % Res. eléctrica de la cubierta
57 B1 = (4 * pi * w / (10^7 * pt))^0.5;
58 gs = 1 + ((ts / Ds)^(1.74)) * ((B1 * Ds * 10^(-3)) - 1.6);
59 m = (1) * (4 * pi * 10^(-7)) * w / (4 * pi * Rs);

```

```

60 % Cable central
61 A1 = 0.86 * (m^(3.08)) * (d / (2 * s))^(1.4 * m + 0.7);
62 A2 = 0;
63 L0 = 6 * (d / (2 * s))^2 * (m^2) / (1 + m^2);
64 % Factor F
65 M = Rs / (XX + Xm);
66 N = Rs / (XX - (Xm / 3));
67 F = (4*(M^2)*(N^2) + ((M + N)^2))/(4 * ((M^2) + 1)*((N^2) + 1));
68 LF = F*(Rs/Rac)*(gs*L0*(1+A1+A2) + (((B1*ts)^4)/(12 * 10^12)));
69 L1 = L1sa + LF; % Pérdidas en las vainas
70
71 % Resistencia térmica del aislamiento y de la cubierta exterior
72 T1 = (PT1 / (2 * pi)) * log(1 + (2 * ti) / dc);
73 T2 = (PT2 / (2 * pi)) * log(1 + (2 * tce) / dce);
74
75 % Pérdida dieléctrica
76 Dae = 2 * (((dc) / 2) + tcs + tpc + ti + tpa);
77 dai = 2 * (((dc) / 2) + tcs);
78 Ce = (Eais/(18 * log(Dae / dai)))*10^(-9); % Capacitancia (F/m)
79 Wd = w * Ce * (U0^2) * TgA; % Pérdidas dieléctricas
80
81 % Parámetros a, b, c y d
82 n1 = 1; % Es el número de conductores de cable
83 aa = Tc - Ta - Wd * (0.5 * T1 + T2);
84 bb = -n1 * Wd;
85 cc = Rac * (T1 + (1 + L1) * n1 * T2);
86 dd = n1 * Rac * (1 + L1);
87 N1 = 3; % Número de cables
88
89 % Factor G_b
90 Gb = log(4*LG/h) - (h/(2*W))*((4/pi) - (h/W))*log(1 + (W/h)^2);
91 P = (pr / (2 * pi)) * log((4 * L / De) * (1 + ((2 * L / s)^2)));
92 E = aa + bb * (P + N1 * (ps - pr) * Gb / (2 * pi));
93 Z = cc + dd * (P + N1 * (ps - pr) * Gb / (2 * pi));

```

```

94 % Funciones objetivo
95 f1 = sqrt(E/Z); % Función objetivo de amplitud
96 f2 = 30*W*LG + 43.5*(W*h) - 28.5*((3/4)*pi*(De^2)); % Costo

```

Listing B.1: Funciones objetivo

```

1 function Y=population(p ,nv ,lb ,ub)
2 % nv = número de variables
3 % p = tamaño de la población
4 % lb = límite inferior
5 % ub= límite superior
6 for i = 1:p
7     for j = 1:nv
8         Y(i ,j)=(ub(j)-lb(j))*rand+lb(j);
9     end
10 end
11 Y = Y;

```

Listing B.2: Población

```

1 function Y=evaluation(P ,ot)
2 [x1 y1]=size(P);
3 H=zeros(x1 ,1);
4 for i = 1:x1
5     H(i ,1)=ObjectiveFunction(P(i ,:));
6 end
7 if ot==1
8     Y=H;
9 else
10    Y=10^6-H;
11 end

```

Listing B.3: Evaluación

```

1 function [YY1 YY2]=selection(P1 ,B ,p ,s)

```

```

2 % P1 - población
3 % B - fitness value
4 % p - tamaño de la población
5 % s = seleccionar los cromosomas s superiores
6 B=B';
7 for i=1:s
8     [r1 c1]=find(B==max(max(B)));
9     Y1(i,:)=P1(max(c1),:);
10    Fn(i)=B(max(c1));
11    P1(max(c1),:)=[] ;
12    B(max(c1))=[] ;
13    clear r1 c1
14 end
15 % Determinar el fitness total de la población
16 C=sum(B);
17 % Determinar la probabilidad de selección
18 D=B/C;
19 % Determinar la probabilidad acumulada
20 E=cumsum(D);
21 % Genere un vector que contenga N=sort(rand(1,p)) normalizado
22 N=rand(1);
23 d1=1;
24 d2=s;
25 while d2<=p-1
26     if N<=E(d1)
27         Y1(d2+1,:)=P1(d1,:);
28         Fn(d2+1)=B(d1);
29         P1(d1,:)=[] ;
30         B(d1)=[];
31         C=sum(B);
32         D=B/C;
33         E=cumsum(D);
34         N=rand(1);
35         d2=d2+1;

```

```

36         d1=1;
37
38     else
39
40 end
41 YY1=Y1;
42 YY2=Fn;
43 end

```

Listing B.4: Selección

```

1 function Y=crossover(P,n)
2 % P = población.
3 % n = núm. de pares de cromosomas a cruzar
4 [x1 y1]=size(P);
5 Z=zeros(2*n,y1);
6 for i = 1:n
7     r1=randi(x1,1,2); % seleccionar 2 cromosomas parentales al azar
8     while r1(1)==r1(2)
9         r1=randi(x1,1,2);
10    end
11    A1=P(r1(1),:); % cromosoma 1 para cruce
12    A2=P(r1(2),:); % cromosoma 2 para cruce
13    r2=1+randi(y1-1); % punto de corte aleatorio
14    B1=A1(1,r2:y1); % exchange
15    A1(1,r2:y1)=A2(1,r2:y1);
16    A2(1,r2:y1)=B1;
17    Z(2*i-1,:)=A1;
18    Z(2*i,:)=A2;
19 end
20 Y=Z;

```

Listing B.5: Cruce

```

1 function Y=mutation(P,n)

```

```

2 % P = población
3 % n = el número de pares de cromosomas a mutar
4 [x1 y1]=size(P);
5 Z=zeros(2*n,y1);
6 for i = 1:n
7     r1=randi(x1,1,2);
8     while r1(1)==r1(2)
9         r1=randi(x1,1,2);
10    end
11    A1=P(r1(1),:); % cromosoma 1 para mutación
12    A2=P(r1(2),:); % cromosoma 2 para mutación
13    r2=1+randi(y1-1); % generación aleatoria
14    A0 = A1(r2); % intercambiar la generación seleccionada
15    A1(r2)=A2(r2);
16    A2(r2)=A0;
17    Z(2*i-1,:)=A1;
18    Z(2*i,:)=A2;
19 end
20 Y=Z;

```

Listing B.6: Mutación

```

1 function Y=local_search(X,s,lb,ub)
2 % X = mejor solución actual
3 % Tamaño del paso
4 [x,y]=size(X);
5 A=ones(2*y,1)*X;
6 j=1;
7 for i=1:y
8     L1=X(1,j)+s*rand;
9     if L1>ub(i)
10        L1=ub(i);
11    end
12    if L1 < lb(i)
13        L1 = lb(i);

```

```

14    end
15    A(2*i-1,j)=L1;
16    L2=X(1,j)-s*rand;
17    if L2 > ub(i)
18        L2 = ub(i);
19    end
20    if L2 < lb(i)
21        L2 = lb(i);
22    end
23    A(2*i,j)=L2;
24    j=j+1;
25 end
26 Y=A;

```

Listing B.7: Búsqueda Local

```

1 clc; clear all; close all;
2 tic
3 %% Problema
4 nv = 5;      % Número de variables
5 De=0.147;    % diámetro exterior del cable (m)
6 lb = [0.5 0.6 1.2 0.6 De];    %Límite inferior de la variable
7 ub = [2 4 4 3 2];
8 ot=1;          % Minimización ot=-1; maximización ot=1
9 t=10;          % Tiempo de cálculo (s)
10 %% Parámetros de GA
11 p = 100;      % Tamaño de la población
12 c=80;          % Tasa de cruce
13 m=1;          % Tasa de mutación
14 s=5;          % Proceso de búsqueda de reinicio adaptativo
15 g=3;          % Mantener los mejores cromosomas (elite chromosomes)
16 r=3;          % número de cromosomas iniciales
17 ms=0.001;     % tamaño máximo de paso para búsqueda local
18 %% Criterios de parada
19 tg=10000000;   % número de generación

```

```

20 P1=population(r,nv,lb,ub); % Estimación inicial
21 w=1;
22
23 for j=1:tg
24     P=population(p-r,nv,lb,ub);
25     P(p-r+1:p,:)=P1;
26     for i=1:tg
27         %Población extendida
28         P(p+1:p+2*c,:)=crossover(P,c);
29         P(p+2*c+1:p+2*c+2*m,:)=mutation(P,m);
30         P(p+2*c+2*m+1:p+2*c+2*m+2*nv,:)=local_search(P(1,:),ms,lb,ub);
31         for rp=1:p+2*c+2*m+2*nv
32             P(rp,:)=constraint_and_repair(P(rp,:),nv,lb,ub);
33         end
34         %Operación de evaluación
35         E=evaluation(P,ot);
36         [P S2]=selection(P,E,p,g);
37         if ot==1
38             KK(w,1)=sum(S2)/p;
39             KK(w,2)=S2(1,1);
40         else
41             KK(w,1)=sum(10^6 - S2)/p;
42             KK(w,2)=10^6 - S2(1,1);
43         end
44         w=w+1;
45         if w-1>s
46             A=KK(w-s:w-1,2);
47             B=abs(diff(A));
48             if sum(B)<=0.0001
49                 break
50             end
51         end
52         if toc > t
53             break

```

```

54         end
55
56
57     % Seleccionar los mejores cromosomas
58
59     for k=1:r
60
61         [x,y]=find(S2==max(S2));
62
63         P1(k,:)=P(max(y),:);
64
65         P(max(y),:)=[];
66
67         S2(:,max(y))=[];
68
69         clear x y
70
71     end
72
73     % Nota: P1 = cromosomas superiores
74
75     if toc > t
76
77         break
78
79     end
80
81     clear P
82
83 end
84
85 % Graficar la evolución de la función objetivo
86
87 figure
88 hold all
89
90 if ot == 1
91
92     title('Blue - Avarage Red - Maximun');
93 else
94
95     title('Blue - Avarage Red - Minimun');
96 end
97
98 xlabel('Generation')
99 ylabel('fitness value')
100 plot(KK(:, 1), 'b.');
101 plot(KK(:, 2), 'r.');
102
103 if ot==1
104
105     objective_function=max(KK(:,2))
106 else

```

```

88     objective_function=min(KK(:,2))
89 end
90 optimal_solution=P1(1,:)
91 % Imprimir KK con cuatro cifras decimales después del punto
92 disp('KK:');
93 % fprintf ('%.4f\t%.4f\n', KK);
94 fprintf('convergencia del objetivo máximo\n');
95 fprintf('%.4f\n', KK(:, 2));

```

Listing B.8: Código Principal de GA

B.2 PSO con Mejoras

```

1 function oF = objective_function(x)
2     % ... (resto de tu código aquí)
3     f1 = sqrt(E/Z);                      % Ampacidad
4     f2 = 30*W*LG + 43.5*(W*h) - 28.5*((3/4)*pi*(De^2)); % Costo
5 % Definición de las restricciones de la forma g(x) <= 0
6     Con=[];
7     Con(1) = h - W;
8     Con(2) = 0.3 + s - (W/2);
9     Con(3) = 0.2 - LG + (h/2);
10    Con(4) = 0.3 + (De/2) + LG - (h/2) - L;
11    Con(5) = 0.3 + (De/2) - LG - (h/2) + L;
12    Con(6) = LG + (h/2) - 3;
13    Con(7) = -LG - (h/2) + 1.3;
14
15    penalty = 0; % Inicializar penalización
16    k = 3.9 * 10^(5);
17    for i = 1:length(Con)
18        if Con(i) > 0
19            penalty = penalty + k * Con(i); % k es coef. de penali..
20        end
21    end

```

```

22     f1_penalized = f1 - penalty; % maximizar la amplitud
23 end

```

Listing B.9: Código MATLAB de PSO

```

1 clc
2 clear all
3 close all
4 tic; % Comienza el temporizador
5
6 %% Problema
7 nVar = 5; % Número de variables
8 VarSize = [1 nVar];
9 De = 0.147;
10 VarMin = [0.5 0.6 1.2 0.6 De]; % Límite inferior de la variable
11 VarMax = [2 4 4 3 2]; % Límite superior de la variable
12
13 %% Parámetros de PSO
14 MaxIter = 1000; % Número máximo de iteraciones
15 nPop = 100; % Tamaño de la población
16 w = 1; % Inercia
17 d = 0.88; % Relación de amortiguación de la inercia
18 c1 = 1; % Aceleración 1
19 c2 = 2; % Aceleración 2
20 %% Inicialización
21 x0.position = [];
22 x0.velocity = [];
23 x0.fitness = [];
24 x0.best.position = [];
25 x0.best.fitness = [];
26 x = repmat(x0, nPop, 1); % Crear población
27 global_best.fitness = -inf;
28
29 %% Generar población inicial
30 for i = 1:nPop

```

```

31 % Generar soluciones aleatorias
32 for k = 1:nVar
33     x(i).position(k) = unifrnd(VarMin(k), VarMax(k));
34 end
35 x(i).velocity = zeros(VarSize);      % Velocidad inicial
36 x(i).fitness = objective_function(x(i).position);
37 x(i).best.position = x(i).position; % Act. la mejor local
38 x(i).best.fitness = x(i).fitness;   % Act. la mejor local
39 if x(i).best.fitness > global_best.fitness
40     global_best = x(i).best;
41 end
42 end
43 B = zeros(MaxIter, 1); % Guardar la mejor FITNESS
44 C = zeros(MaxIter, nVar);
45 %% Programa principal
46 disp('Iteración\t\tBest\tfitness:');
47 for j = 1:MaxIter
48     for i = 1:nPop
49         % Actualizar velocidad y posición
50         x(i).velocity = w * x(i).velocity + c1 * rand(VarSize) .*
51             (x(i).best.position - x(i).position) + c2 * rand(VarSize) .*
52             (global_best.position - x(i).position);
53
54         x(i).position = x(i).position + x(i).velocity;
55         % Comprobar el rango
56         for k = 1:nVar
57             x(i).position(k) = max(VarMin(k), min(x(i).
58                 position(k), VarMax(k)));
59         end
60
61         % Actualizar la mejor local
62         x(i).fitness = objective_function(x(i).position);
63         if x(i).fitness > x(i).best.fitness
64             x(i).best.position = x(i).position;

```

```

65         x(i).best.fitness = x(i).fitness;
66
67         if x(i).best.fitness > global_best.fitness
68             global_best = x(i).best;
69         end
70
71     end
72
73     w = w * d; % Actualizar la relación de amortiguación
74
75     % Guardar la mejor fitness y posición en esta iteración
76     B(j) = global_best.fitness;
77
78     C(j, :) = global_best.position;
79
80
81     % Imprimir los resultados de esta iteración
82     disp([num2str(j) ' ' num2str(B(j))]);
83
84     % Graficar los resultados en tiempo real
85     plot(B(1:j), 'r.');
86     xlabel('Iteraciones');
87     ylabel('Mejor fitness');
88     title('Mejor fitness en cada iteración');
89     grid on;
90     drawnow;
91
92 end
93
94
95
96 % Imprimir el máximo valor del objetivo y las variables
97 max_fitness = max(B);
98
99 idx_max_fitness = find(B == max_fitness, 1);
100 disp(' ');
101 disp('Máximo valor del objetivo (Best fitness): ');
102 disp(num2str(max_fitness));
103 disp('Variables correspondientes al máximo valor del objetivo: ');
104 disp(num2str(C(idx_max_fitness, :)));
105
106
107 toc; % Finaliza el temporizador

```

Listing B.10: Código Principal de PSO - Versión Básica

Apéndice C

Matriz de Consistencia

La siguiente tabla presenta la Matriz de Consistencia, donde se establece la relación entre los objetivos, las preguntas de investigación, las variables y las fuentes de información utilizadas en el estudio.

Tabla C.1: Matriz de Consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables, Dimensiones, Indicadores	Método
Problema Principal	Objetivo General	Hipótesis Principal	Variables Independientes	
¿Cómo optimizar la instalación de cables subterráneos de alta tensión teniendo en cuenta el costo, la ampacidad y la vida útil?	Desarrollar una metodología de optimización para la instalación de cables subterráneos de alta tensión que integre costo, ampacidad y vida útil.	La implementación de una metodología de optimización en la instalación de cables subterráneos de alta tensión tiene el potencial de optimizar de manera eficiente la ampacidad, reducir significativamente los costos de instalación y alargar la vida útil del cable.	<ul style="list-style-type: none"> 1. Dimensiones de la Zanja 2. Características del relleno térmico 3. Parámetros Probabilísticos 4. Método de Optimización 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta investigación adopta un enfoque mixto, combinando elementos explicativos, descriptivos y correlacionales para abordar de manera integral la optimización de la instalación de cables subterráneos de alta tensión. • La población de interés para esta investigación incluye ingenieros eléctricos, diseñadores de sistemas eléctricos y profesionales relacionados con la instalación de cables subterráneos de alta tensión.
Problemas Secundarios	Objetivos Específicos	Hipótesis Secundarias	Variable Dependiente	
	<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Cómo determinar los valores óptimos para las dimensiones de la zanja, el relleno térmico y la ampacidad de los cables y qué técnica de optimización es adecuada? 2. ¿Cómo optimizar el costo y la ampacidad de los cables subterráneos de alta tensión y determinar el frente de Pareto para seleccionar la solución más eficiente? 3. ¿Cómo lograr una optimización efectiva y simultánea de la ampacidad, el costo de instalación y la vida útil del cable, teniendo en cuenta las variaciones ambientales y del suelo, así como los armónicos del sistema? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La formulación y aplicación de una metodología de optimización no lineal con restricciones físicas y económicas, utilizando algoritmos genéticos y de enjambre de partículas con función de penalización autoadaptativa, permitirá optimizar eficientemente la instalación de cables subterráneos de alta tensión. 2. Proponer y evaluar un enfoque de optimización multiobjetivo para la instalación de cables subterráneos de alta tensión, integrando el algoritmo de optimización FMINCON y PSO con el modelo de suma ponderada, y determinar el frente de Pareto para comparar con el algoritmo gamitlib de MATLAB. 3. Desarrollar un enfoque de optimización multiobjetivo con el método de suma ponderada, la técnica de optimización PSO y el enfoque probabilístico para optimizar simultáneamente la ampacidad, los costos de instalación y la vida útil del aislamiento de los cables subterráneos de alta tensión. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eficiencia de la Ampacidad, 2. Costo de Instalación 3. Vida Útil del Aislamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizó MATLAB para implementar algoritmos de optimización, realizar simulaciones y análisis numéricos. La programación en MATLAB permitió llevar a cabo la comparación de algoritmos como PSO, GA y FMinCon, así como la evaluación del rendimiento de la metodología propuesta. • Origin fue empleado para la creación de gráficos y visualización de datos. La capacidad de Origin para generar gráficos detallados y personalizados facilitó la interpretación visual de los resultados obtenidos durante el análisis de datos.