

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Valparaíso - Chile



**“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA
COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO DE CONDUCTORES
ELÉCTRICOS DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN EN PROYECTOS DE
MINERÍA PARA HATCH CHILE”.**

PATRICIO FRANCISCO ÁLVAREZ OJEDA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

Profesor Guía

DR. ALEJANDRO ANGULO CÁRDENAS

Referente

ING. EDUARDO LAZO ROJAS (HATCH)

25 de junio de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: **DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN EN PROYECTOS DE MINERÍA PARA HATCH CHILE**

Nombre del candidato(a): **PATRICIO FRANCISCO ÁLVAREZ OJEDA**

Carrera / Grado: **INGENIERÍA CIVIL ELÉCTRICA**

Campus: **CASA CENTRAL VALPARAÍSO**

Departamento: **DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **ALEJANDRO ALBERTO ÁNGULO CARDENAS**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato **establecidos** por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29/09/2026

Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/09/2026

Firma: _____

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.

“Cuando tenía 15 años, tuve una persona importante en mi vida que me dijo ‘¿Quién es tu héroe?’ Y le dije que no sabía, que tenía que pensarlo, que me diera un par de semanas. Volvió dos semanas después y me preguntó ‘¿Quién es tu héroe?’ Lo pensé y le dije que ya lo sabía, que era yo dentro de 10 años.

Cumplí 25, 10 años más tarde la misma persona me preguntó ‘¿entonces ya eres un héroe?’ Y le dije que no estaba ni cerca. No, no, no. Y me preguntó por qué. Le dije que porque mi héroe sería yo a los 35. Cada día, cada semana, cada mes y cada año de mi vida, mi héroe siempre soy yo en 10 años. Nunca podré superar a mi héroe. Nunca lo alcanzaré, sé que no. Y está bien porque me mantiene persiguiendo a alguien”

– Matthew McConaughey

Agradecimientos

Quiero pedir de antemano disculpas a todo aquel que no recuerde en este breve homenaje a aquellos que han ayudado a pavimentar este largo camino.

En primer lugar gracias a mi familia, especialmente a mis padres Patricio y Laura, me han enseñado todo y son grandes responsables de la persona que soy y seré en la vida, sin ustedes no sería nada y por ustedes lo seré todo. A mi hermano Sebastián, gracias por acompañarme desde que tengo consciencia, has pasado de ser alguien a quién creía que debía proteger y preocuparme a una persona que me inspira constantemente por la calidad humana y técnica que tienes, gracias por empujarme a superarme. Y también al resto de mi familia: mi innumerable cantidad de tíos, primos, abuelos que no lograron llegar hasta aquí Eduardo y María Ángela, y a mi viejita Nelly que aún me queda y siempre logra ver, por más imperfecto que sea, a una gran persona. Esto es por ustedes.

A mis amigos y compañeros de universidad, los *Cangris*, gracias por estar, por acompañar en todos los momentos buenos y por supuesto, los no tan buenos que parecen abundar tanto en esta etapa, cada día madrugando y noche desvelada, espero de corazón que valga la pena todos los sacrificios y todos alcancen las metas que tan ambiciosamente deseamos. Sobre todo a Gonzalo, Nicolás (s), Abraham, Carlos, Rodrigo, Martín, Alfonso, Camilo, Luis, personas con las que tuve el gusto de hacer trabajos y vivir experiencias que te revelan que realmente en la amistad hay una segunda familia, gracias por aguantarme.

A mis compañeros de trabajo en Hatch, Matías, Sergio y Alberto, quienes desde el inicio me han demostrado una amistad incondicional a pesar del poco tiempo que nos conocemos, convirtiendo la labor del día a día en algo ameno y fraternal. También a mis mentores, Eduardo, Sergio y Mauricio, quienes no han dudado de poner de su tiempo y conocimiento a mi disposición, instruyéndome de paso a formarme en el tipo de profesional que me gustaría llegar a ser. Obviamente también a Hatch, por darme la oportunidad y confianza de aportar con un grano de arena a la mejora continua de su proyecto como empresa.

A los profesores de la UTFSM que tuve el gusto de conocer y servir como estudiante, sobre todo a Alejandro Angulo, mi profesor guía, quien tuvo la disposición de enseñarme y aguantar mi falta de comprensión varias veces, siempre con profesionalismo y excelencia.

Asimismo, agradezco a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), cuyo apoyo, a través de los proyectos ANID AC3E CIA 250006 y ANILLO ACT250059, contribuyó al desarrollo de este trabajo.

En fin, gracias a todos por ser parte de este arduo y emocionante camino, gracias por soportarme y ser voluntaria o involuntariamente, parte de este inolvidable capítulo de mi vida.

Resumen

En proyectos industriales y mineros, el dimensionamiento de conductores en media y baja tensión exige verificar, en forma simultánea, criterios térmicos y eléctricos. Entre ellos destacan la ampacidad normativa, la caída de tensión en régimen permanente y en partida de motores, y la capacidad térmica ante cortocircuito. En la práctica, estas verificaciones suelen implementarse mediante planillas y macros. Esto dificulta la trazabilidad de supuestos, limita la estandarización entre proyectos y aumenta el esfuerzo de revisión.

Esta memoria presenta el desarrollo e implementación de una herramienta computacional para estandarizar la estimación y selección de conductores en Hatch Chile. La plataforma integra el flujo de datos en planillas corporativas con rutinas de cálculo en Python, organizadas en módulos para consolidar verificaciones técnicas y, de manera opcional, una evaluación económico-energética asociada a pérdidas. Adicionalmente, para canalizaciones subterráneas donde la aproximación tabulada puede resultar insuficiente, se incorpora un análisis térmico bidimensional por elementos finitos en bancos de ductos. Este análisis se automatiza mediante FEMM y permite estudiar el acoplamiento térmico, además de realizar evaluaciones paramétricas de forma reproducible.

El desempeño de la herramienta se revisa mediante comparaciones acotadas con referencias externas y con resultados de planillas utilizadas en proyectos. Los resultados muestran consistencia en las selecciones obtenidas y una reducción del trabajo manual asociado al procesamiento por lotes. En conjunto, el trabajo mejora la trazabilidad, repetibilidad y eficiencia del proceso de dimensionamiento, y deja una base escalable para futuras extensiones hacia nuevos criterios, configuraciones de instalación y campañas de validación más amplias.

Palabras clave: selección de conductores, ampacidad, caída de tensión, cortocircuito, bancos de ductos, elementos finitos, IEC, NEC, minería.

Abstract

In mining and industrial projects, medium- and low-voltage cable sizing requires the simultaneous verification of thermal and electrical criteria. Key checks include normative ampacity, steady-state and motor-start voltage drop, and short-circuit thermal withstand. In practice, these tasks are often performed using spreadsheets and macros. This reduces the traceability of assumptions, limits standardization across projects, and increases peer-review effort.

This thesis presents the development and implementation of a computational tool to standardize conductor sizing in the context of Hatch Chile. The platform combines corporate spreadsheet-based inputs/outputs with Python calculation routines, organized into modules that consolidate technical checks and, optionally, an energy-loss economic assessment. In addition, for underground installations where tabulated approaches may be insufficient, a two-dimensional finite-element thermal analysis for duct banks is incorporated. The analysis is automated through FEMM, enabling the study of thermal coupling and reproducible parametric evaluations.

The tool is assessed through a limited set of comparisons against external references and spreadsheet results from real project datasets. The results show consistent selections and a reduced manual workload for batch processing. Overall, the work improves traceability, repeatability, and efficiency in conductor sizing, and provides a scalable foundation for future extensions toward additional criteria, installation configurations, and broader validation campaigns.

Keywords: cable sizing, ampacity, voltage drop, short-circuit, duct banks, finite elements, IEC, NEC, mining.

Glosario

En esta memoria se emplean símbolos y convenciones provenientes de distintas normas y referencias (por ejemplo, IEC, NEC/NFPA e IEEE). En algunos casos, un mismo concepto puede aparecer con notación distinta según la fuente (por ejemplo, corriente admisible, resistencias o factores de corrección). Con el fin de evitar ambigüedades, el presente glosario fija el significado que se utiliza en el documento; cuando se adopta explícitamente una notación alternativa, ello se indica en el texto correspondiente.

Acrónimos y abreviaciones

Acrónimo	Definición
HARS	Hatch Ampacity Rating Software (herramienta desarrollada).
GUI	Graphical User Interface (interfaz gráfica de usuario).
CableFunc	Macromódulo de selección técnica de conductores (ampacidad, caída de tensión y cortocircuito).
EconFunc	Macromódulo de evaluación económica por pérdidas (CAPEX vs OPEX), basado en IEC 60287-3-2.
DuctBankFunc	Macromódulo de análisis térmico 2D por elementos finitos para bancos de ductos.
IEC	International Electrotechnical Commission.
NEC	National Electrical Code (NFPA 70).
NFPA	National Fire Protection Association.
RIC	Pliegos técnicos del Reglamento de Instalaciones de Consumo (Chile).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
ETAP	Electrical Transient Analyzer Program (software comercial de análisis eléctrico).
FEM	Finite Element Method (método de elementos finitos).
FEMM	Finite Element Method Magnetics (software 2D; se usa el modo Heat Flow).
PyFEMM	Interfaz Python para automatizar FEMM.
CAPEX	Capital Expenditure (costo de inversión).
OPEX	Operating Expenditure (costo operativo).
AWG	American Wire Gauge (sistema de calibres).
kcmil	Thousand circular mils (unidad asociada a calibres en NEC).
XLPE	Cross-Linked Polyethylene (aislación de polietileno reticulado).
EPR	Ethylene Propylene Rubber (aislación elastomérica).
AC/DC	Alternating Current / Direct Current (corriente alterna / continua).

Acrónimo	Definición
CCC	Current-Carrying Conductors (conductores portadores de corriente; criterio de agrupamiento en NEC).
DOL	Direct-On-Line (partida directa).
VSD	Variable Speed Drive (variador de velocidad/frecuencia).

Símbolos y variables

Símbolo	Descripción	Unidad
I_B	Corriente de diseño del circuito.	A
I_{cond}	Corriente por conductor cuando existen paralelos (I_B/N_{SC}).	A
N_{SC}	Número de conductores en paralelo por fase.	1
I_{tab}	Ampacidad tabulada (condiciones de referencia).	A
I_{perm}	Ampacidad permisible corregida (tablas $\times$ factores).	A
I_{adm}	Corriente admisible (criterio tabulado o FEM).	A
I_{cc}	Corriente de cortocircuito (falla).	A
t	Tiempo de despeje / duración del cortocircuito.	s
V_{LL}	Tensión línea-línea.	V
V_{nom}	Tensión nominal de alimentación.	V
ΔV_{rp}	Caída de tensión en régimen permanente.	V
Reg_{rp}	Regulación en régimen permanente.	%
ΔV_p	Caída de tensión durante partida.	V
Reg_p	Regulación durante partida.	%
R_c, X_c	Resistencia y reactancia del cable por unidad de longitud.	Ω/m
Z_c	Impedancia equivalente del cable $Z_c = (R_c + jX_c) L/N_{SC}$.	Ω
Z_p	Impedancia equivalente del motor durante partida (modelo simplificado).	Ω
R_p, X_p	Componentes resistiva y reactiva de Z_p .	Ω
$\cos \varphi$	Factor de potencia en régimen permanente.	1
$\cos(\varphi_s)$	Factor de potencia durante partida.	1
η	Eficiencia (por ejemplo, motor).	1
L	Longitud del circuito/alimentador.	m
T_c	Temperatura del conductor.	$^{\circ}\text{C}$
T_a	Temperatura ambiente (o referencia).	$^{\circ}\text{C}$
T_{lim}	Límite térmico del conductor/aislación.	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{máx}}$	Temperatura máxima del conductor (salida FEM).	$^{\circ}\text{C}$
k	Conductividad térmica.	W/m K

Símbolo	Descripción	Unidad
ρ_{th}	Resistividad térmica del suelo/relleno.	Km/W
h_{conv}	Coeficiente convectivo.	W/m ² K
ε	Emisividad superficial.	1
σ_{SB}	Constante de Stefan–Boltzmann.	W/m ² K ⁴
CI	Costo de inversión/instalación.	USD
CJ	Costo equivalente por pérdidas (valor presente).	USD
CT	Costo total equivalente ($CT = CI + CJ$).	USD
N	Horizonte de evaluación.	1
i	Tasa de descuento anual.	%
P_e	Precio unitario de energía.	USD/MWh

Índice general

Resumen	II
Abstract	III
Glosario	IV
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcances y limitaciones	4
1.4. Metodología general	4
1.5. Estructura del documento	5
2. Marco teórico	6
2.1. Selección de conductores en instalaciones industriales	6
2.1.1. Rol de los conductores y variables de diseño	6
2.1.2. Métodos de instalación y su influencia en la selección del conductor	7
2.1.3. Corriente de diseño del circuito	9
2.1.4. Restricciones técnicas típicas: ampacidad, caída de tensión y cortocircuito	9
2.2. Fundamentos electro-térmicos de la ampacidad	10
2.2.1. Balance térmico en régimen permanente y definición de ampacidad	11
2.2.2. Pérdidas eléctricas relevantes en cables de potencia	11
2.2.3. Resistencia del conductor y dependencia con la temperatura	12
2.2.4. Efectos adicionales en la resistencia AC: skin y proximidad	12
2.2.5. Ecuación de calor y formulación estacionaria	13
2.2.6. Mecanismos de transferencia de calor y resistencias térmicas equivalentes	13
2.3. Métodos normativos tabulados para la estimación de ampacidad	17
2.3.1. Tablas y factores bajo normativa IEC	17
2.3.2. Tablas y factores en el marco NEC (NFPA 70)	18
2.3.3. Aplicación en Chile: RIC N°04	19
2.4. Modelación térmica en canalizaciones complejas	19
2.4.1. Bancos de ductos: acoplamiento térmico y sensibilidad geométrica	19
2.4.2. Intercambio en cavidades: convección natural interna y radiación en el anillo de aire	21
2.4.3. Fundamento de la formulación 2D por elementos finitos	23

2.5.	Criterios eléctricos complementarios para la selección de conductores	23
2.5.1.	Regulación de tensión	24
2.5.2.	Capacidad térmica frente a cortocircuitos	25
2.5.3.	Selección del calibre como problema de restricciones	26
2.6.	Evaluación económica del ciclo de vida de los conductores	27
2.6.1.	Costo total equivalente y componentes	27
2.6.2.	Costo equivalente de pérdidas CJ	28
2.6.3.	Modelo continuo para resistencia y costo de inversión	29
2.6.4.	Tamaño económico y proyección a calibres normalizados	29
3.	Herramientas computacionales	30
3.1.	Lenguaje de desarrollo y bibliotecas de soporte	30
3.2.	Interfaz gráfica de usuario	31
3.2.1.	Estructura base de la ventana	31
3.2.2.	Widgets principales utilizados	31
3.2.3.	Eventos y retroalimentación	33
3.3.	Simulación térmica por elementos finitos: FEMM y enlace con Python	33
3.3.1.	FEMM como plataforma de elementos finitos	33
3.3.2.	PyFEMM: automatización y acoplamiento con el flujo de cálculo	34
3.4.	Manejo de planillas y generación de resultados	34
3.5.	Distribución de la herramienta como ejecutable	34
4.	Descripción de la plataforma implementada	36
4.1.	Descripción general de la plataforma	36
4.1.1.	Entradas y modelo de datos	37
4.1.2.	Flujo de selección técnica y evaluación económica	38
4.1.3.	Estudio térmico por elementos finitos en bancos de ductos	38
4.1.4.	Exportación y trazabilidad de resultados	38
4.2.	Selección técnico–económica de conductores (CableFunc)	39
4.2.1.	Preprocesamiento de datos del circuito	40
4.2.2.	Criterio de ampacidad normativa	41
4.2.3.	Criterio de caída de tensión en régimen permanente	43
4.2.4.	Criterio de caída de tensión en partida de motores	44
4.2.5.	Criterio térmico ante cortocircuito	46
4.2.6.	Consolidación técnica y reporte de conductores válidos	47
4.3.	Optimización económica por pérdidas (EconFunc)	48
4.4.	Estudio térmico por elementos finitos (DuctBankFunc)	51
4.4.1.	Modelo físico y supuestos de simulación	53
4.4.2.	Secuencia común del análisis FEM automatizado	54
4.4.3.	Iteración termo–eléctrica y estabilización numérica	56
4.4.4.	Modos de operación	57
4.4.5.	Salidas del análisis térmico	60

5. Implementación de la herramienta y validación de resultados	62
5.1. Alcance y criterios de comparación	62
5.2. Validación de CableFunc y EconFunc (vs. planilla corporativa)	63
5.2.1. Caso de prueba y datos de entrada	63
5.2.2. Comparación de resultados	63
5.2.3. Validación de EconFunc (CAPEX vs. OPEX por pérdidas)	66
5.3. Validación de DuctBankFunc (vs. referencia y ETAP)	67
5.3.1. Caso base y configuración del modelo	67
5.3.2. Sensibilidades de parámetros dominantes	68
5.3.3. Comparación contra ETAP y referencia tipo NEC/IEEE	72
6. Conclusiones y futuros alcances	74
6.1. Discusión y cierre de validación	74
6.2. Aportes principales	75
6.3. Limitaciones	75
6.4. Mejoras y trabajo futuro	75
Anexos	82
A. Tablas de Ampacidad	83
A.1. Norma IEC 60364-5-52	83
A.2. Norma IEC 60502-2	85
A.3. Norma RIC N°4	87
A.4. Norma NFPA-70	90
B. Factores de corrección	94
B.1. Norma IEC 60364-5-52	94
B.2. Norma IEC 60502-2	99
B.3. Norma RIC N°4	106
B.4. Norma NFPA-70	107
B.5. Norma IEEE-399	108
C. Parámetros eléctricos de proveedores	111
D. Propiedades para el aire	114
E. Planillas corporativas usadas	115
E.1. Planilla de entrada	115
E.2. Planilla de salida decisión técnica	115
E.3. Planilla de salida decisión económica	115
F. Diseño de la GUI	116

Índice de figuras

2.1.	Ejemplo de instalación en aire tipo ladder. Fuente: [15].	7
2.2.	Ejemplo de instalación tipo conducto montado. Fuente: [16].	8
2.3.	Ejemplo de instalación subterránea directamente enterrada. Fuente: [17].	8
2.4.	Ejemplo de instalación tipo banco de ductos. Fuente: [18].	8
2.5.	Circuito térmico típico para un conductor en canalización. Adaptado de [19]. . .	16
2.6.	Representación esquemática del uso de factores de corrección para ajustar un valor tabulado de ampacidad. Adaptado de [19].	17
2.7.	Fuentes y propagación de calor en cables instalados en banco de ductos. Adap- tada de [26].	20
2.8.	Circuito equivalente para el cálculo de caída de tensión en régimen permanente. Elaboración propia.	24
3.1.	Ejemplo de QLabel en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].	31
3.2.	Ejemplo de QComboBox en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].	32
3.3.	Ejemplo de QSpinBox en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].	32
3.4.	Ejemplo de QPushButton en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].	32
3.5.	Ejemplo de QTableWidgetItem en distintos sistemas operativos. Fuente: [39]. . . .	33
4.1.	Esquema general de funcionalidades de la plataforma y sus ramas principales. Elaboración propia.	37
4.2.	Lógica del macromódulo de selección técnico–económica de conductores. Ela- boración propia.	40
4.3.	Lógica del módulo de ampacidad normativa. Elaboración propia.	42
4.4.	Lógica del módulo de caída de tensión en régimen permanente. Elaboración propia.	44
4.5.	Lógica del módulo de caída de tensión en partida de motores. Elaboración propia.	45
4.6.	Lógica del módulo de cortocircuito térmico. Elaboración propia.	46
4.7.	Lógica del módulo de optimización económica por pérdidas. Elaboración propia.	49
4.8.	Flujo general de la rama térmica: definición del caso, selección de modo y reportes de salida. Elaboración propia.	52
4.9.	Bloque funcional DuctBankFunc: construcción del caso, actualización de pro- piedades dependientes de temperatura, resolución y postproceso. Elaboración propia.	55
4.10.	Ejemplo de malla triangular utilizada en FEMM para el análisis térmico de un banco de ductos. Elaboración propia.	56
4.11.	Modo ampacidad: búsqueda de la corriente que satisface el límite térmico del conductor. Elaboración propia.	58

4.12. Modo temperatura: cálculo del campo térmico para corrientes definidas por el usuario. Elaboración propia.	59
4.13. Modo curva I–T: barrido de corrientes y registro de la temperatura máxima del conductor por punto. Elaboración propia.	60
5.1. Comparación de calibre final seleccionado (mm^2): planilla corporativa vs. CableFunc. Se utiliza escala logarítmica por el rango amplio de secciones normalizadas.	64
5.2. Clasificación de la selección de calibre: coincidencia exacta, calibre superior e inferior respecto de la planilla corporativa.	65
5.3. Distribución de la diferencia en regulación permanente entre CableFunc y la planilla corporativa (puntos porcentuales).	65
5.4. Sensibilidad de ampacidad por separación centro a centro entre ductos (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm^2). Elaboración propia.	69
5.5. Sensibilidad de ampacidad por diámetro interno del ducto (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm^2). Elaboración propia.	69
5.6. Sensibilidad de ampacidad por resistividad térmica del suelo (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm^2). Elaboración propia.	70
5.7. Sensibilidad de ampacidad por temperatura ambiente exterior (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm^2). Elaboración propia.	70
5.8. Configuración del banco 3×3 con su respectiva numeración de ductos utilizada en FEMM.	71
5.9. Barrido corriente–temperatura: $T_{\text{máx}}$ del conductor por ducto y referencia de límite térmico 90 °C (banco 3×3). Elaboración propia.	72
5.10. Configuración del banco de ductos utilizada en ETAP para la comparación de ampacidad. Fuente: elaboración propia en ETAP.	73
A.1. Tabla de ampacidades para conductores de baja tensión según IEC 60364-5-52 [22] (parte 1).	83
A.2. Tabla de ampacidades para conductores de baja tensión según IEC 60364-5-52 [22] (parte 2).	84
A.3. Tablas de ampacidades para conductores de media tensión según IEC 60502-2 [25] (monoconductores).	85
A.4. Tablas de ampacidades para conductores de media tensión según IEC 60502-2 [25] (multiconductores).	86
A.5. Tablas de ampacidades para conductores de baja tensión según normativa chilena RIC N°4 [8] (parte 1).	87
A.6. Tablas de ampacidades para conductores de baja tensión según normativa chilena RIC N°4 [8] (parte 2).	88
A.7. Tablas de ampacidades para conductores de baja tensión según normativa chilena RIC N°4 [8] (parte 3).	89
A.8. Tabla general de ampacidades para tensiones inferiores a 2000 V según NEC [11].	90

A.9. Tabla de ampacidades para monoconductores en ductos subterráneos según NEC para tensiones inferiores a 2000 V [11].	91
A.10. Tabla de ampacidades para multiconductores en ductos subterráneos según NEC para tensiones inferiores a 2000 V [11].	91
A.11. Ampacidades para conductores en aire según NEC en Media Tensión [11]. . . .	92
A.12. Ampacidades para conductores en ductos según NEC en Media Tensión [11]. .	92
A.13. Ampacidades para conductores directamente enterrados según NEC en Media Tensión [11].	93
B.1. Factores de corrección para temperaturas ambiente distintas de 30°C para cables en aire según IEC 60364-5-52 [22].	94
B.2. Factores de corrección para temperaturas del suelo distintas de 20°C para cables en medios subterráneos según IEC 60364-5-52 [22].	95
B.3. Factores de corrección para resistividades del suelo distintas de 2,5 K·m/W para cables en medios subterráneos según IEC 60364-5-52 [22].	95
B.4. Factores de corrección para monoconductores en canalizaciones en aire según IEC 60364-5-52 [22].	96
B.5. Factores de corrección para multiconductores en canalizaciones en aire según IEC 60364-5-52 [22].	97
B.6. Factores de corrección para conductores en canalizaciones del tipo conduit (no subterráneas) según IEC 60364-5-52 [22].	98
B.7. Factores de corrección para conductores en ductos ubicados horizontalmente entre sí según IEC 60364-5-52 [22].	98
B.8. Factores de corrección para temperaturas ambiente distintas de 30°C para cables en aire según IEC 60502-2 [25].	99
B.9. Factores de corrección para temperaturas del suelo distintas de 20°C para cables en medios subterráneos según IEC 60502-2 [25].	99
B.10. Factores de corrección de acuerdo a profundidad de enterrado de los conductores según IEC 60502-2 [25].	99
B.11. Factores de corrección para resistividades del suelo distintas de 1,5 K·m/W para cables monoconductores en medios subterráneos según IEC 60502-2 [25]. . . .	100
B.12. Factores de corrección para resistividades del suelo distintas de 1,5 K·m/W para cables multiconductores en medios subterráneos según IEC 60502-2 [25]. . . .	101
B.13. Factores de corrección para grupos de cables enterrados horizontalmente entre sí según IEC 60502-2 [25].	102
B.14. Factores de corrección para grupos de cables en ductos dispuestos horizontalmente entre sí según IEC 60502-2 [25].	103
B.15. Factores de corrección para monoconductores en canalizaciones en aire según IEC 60502-2 [25].	104
B.16. Factores de corrección para multiconductores en canalizaciones en aire según IEC 60502-2 [25].	105

B.17. Factor de corrección de capacidad de transporte de corriente por cantidad de conductores en ductos según RIC N°4 [8].	106
B.18. Factores de corrección para ampacidad por variación de temperatura ambiente para conductores según RIC N°4 [8].	106
B.19. Factores de corrección para temperatura ambiente distinta de 30°C según NFPA-70 [11].	107
B.20. Factores de corrección por agrupamiento para más de 3 conductores conduciendo corriente en una misma canalización [11].	107
B.21. Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 0 - 5000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19].	108
B.22. Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 0 - 5000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19] (continuación).	109
B.23. Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 5001 - 35000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19].	109
B.24. Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 5001 - 35000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19] (continuación).	110
C.1. Parámetros eléctricos para el cálculo de la caída de tensión en calibres de cables monoconductores para baja tensión según catalogo de Phelps Dodge [45].	111
C.2. Parámetros eléctricos para el cálculo de la caída de tensión en calibres de cables multiconductores para baja tensión según catalogo de Phelps Dodge [45].	112
C.3. Valores de reactancia inductiva para conductores en media tensión según catalogo de Prysmian Cables [46].	112
C.4. Valores para la resistencia y reactancia de conductores trifásicos de acuerdo a NFPA-70 [11].	113
E.1. Ejemplo planilla de entrada de datos para CableFunc.	115
E.2. Ejemplo planilla de salida para CableFunc.	115
E.3. Ejemplo planilla de salida para EconFunc.	115
F.1. Ventana principal de HARS: importación de datos, configuración del proyecto, selección de disponibilidades y ejecución de módulos.	116
F.2. Ventanas de configuración para condiciones del proyecto, primera parte.	117
F.3. Ventanas de configuración para condiciones del proyecto, continuación.	117
F.4. Ventana de disponibilidad de calibres por nivel de tensión: selección de tipo de cable (monoconductor/multiconductor) para normativa IEC/RIC y NEC.	118
F.5. Ventana DuctWizard (GUI para DuctBankFunc): parametrización del banco de ductos (arreglo, profundidad de enterramiento, separación entre ductos, diámetro interno y resistividad térmica del suelo) y previsualización esquemática de la configuración geométrica.	118

Índice de Tablas

2.1. Analogía entre redes eléctricas y térmicas.	16
4.1. Datos de entrada por circuito en la planilla corporativa.	41
4.2. Información de salida para CableFunc.	48
4.3. Parámetros de entrada para EconFunc. Si no se especifican, se utilizan valores de referencia configurados en la herramienta.	49
4.4. Variables reportadas por EconFunc en la salida económica.	51
4.5. Entradas principales del análisis térmico para DuctBankFunc.	53
4.6. Salidas principales del análisis térmico para bancos de ductos.	61
5.1. Supuestos globales utilizados en el caso de comparación de CableFunc.	63
5.2. Resumen cuantitativo de la comparación entre CableFunc y la planilla corporativa (lote de 291 circuitos). La diferencia de regulación permanente se reporta en puntos porcentuales.	64
5.3. Supuestos económicos usados en la evaluación de EconFunc.	66
5.4. Resumen de resultados de EconFunc en el lote de validación (valores en USD).	67
5.5. Parámetros principales utilizados en la validación de DuctBankFunc.	68
5.6. Conductividades térmicas consideradas. En el caso del aire confinado se utiliza $k_{\text{aire,eff}}(T)$ calculada mediante una correlación equivalente de convección natural.	68
5.7. Comparación de ampacidad para banco de ductos 2×2 (3 monoconductores en <i>flat</i> , 50 mm ²).	73
D.1. Propiedades termo-físicas del aire a presión atmosférica. Adaptado de [47] . . .	114

Capítulo 1

Introducción

Chile es reconocido mundialmente por su liderazgo en minería del cobre, con una participación cercana al 27% de la producción global [1]. Este sector es un pilar estructural de la economía nacional. En promedio, aporta más del 10% del Producto Interno Bruto (PIB) y cerca del 60% de las exportaciones totales [2]. Su impacto laboral también es significativo, con más de 200 mil empleos directos y más de 600 mil empleos indirectos, y efectos relevantes en infraestructura, innovación y transferencia tecnológica, especialmente en las regiones mineras del norte [3].

En los últimos años, la industria ha avanzado hacia operaciones más electrificadas y con mayores exigencias de continuidad operacional. Esto ha incrementado la necesidad de soluciones de ingeniería especializadas y consistentes. En este contexto, las consultoras de ingeniería cumplen un rol estratégico. Aportan metodologías estandarizadas, buenas prácticas y herramientas que facilitan el diseño y verificación de instalaciones eléctricas de mayor complejidad, con trazabilidad y criterios homogéneos. Hatch ha mantenido por décadas un rol relevante como empresa de ingeniería multidisciplinaria, participando en proyectos mineros de gran escala y promoviendo el uso de estándares internacionales, la digitalización de procesos y la mejora continua de los entregables de ingeniería [4–6].

A pesar del alto nivel tecnológico asociado a la gran minería, ciertos procesos de ingeniería eléctrica aún se apoyan en herramientas internas cuyo diseño y mantenimiento no siempre se alinean con prácticas modernas de software. Un ejemplo típico es la selección de conductores eléctricos en media y baja tensión. En entornos corporativos, esta tarea suele resolverse mediante planillas Excel y macros desarrolladas en distintos periodos. Si bien estas planillas han sido útiles, presentan limitaciones recurrentes:

- Trazabilidad reducida: los cambios en fórmulas y supuestos son difíciles de auditar y documentar.
- Mantenibilidad limitada: la actualización frente a revisiones normativas o nuevas configuraciones de instalación suele requerir intervención manual.
- Baja extensibilidad: incorporar nuevos criterios (por ejemplo, evaluación económica por pérdidas o estudios térmicos detallados) resulta complejo y puede aumentar la probabilidad de error.
- Riesgo operacional: al depender de ajustes manuales y supuestos no explícitos, aumenta la probabilidad de inconsistencias entre proyectos y equipos.

En Chile, la actualización normativa mediante los pliegos técnicos RIC, formalizada a través del DS N° 8 (2020), refuerza la necesidad de contar con herramientas alineadas con exigencias actuales, tanto en el ámbito local como en proyectos con clientes internacionales [7–9]. A esto se suman condiciones propias del entorno minero: extensas longitudes de alimentadores, ambientes térmicos exigentes, canalizaciones diversas (bandejas, ductos, bancos de ductos), restricciones de espacio y alta criticidad de ciertas cargas.

En particular, la corriente admisible de un conductor no depende solo de su sección o material. También depende del intercambio térmico con el entorno y del agrupamiento con otros cables. En espacios confinados, la disipación de calor se reduce, aumenta la temperatura de operación y disminuye la ampacidad. El tratamiento normativo de este fenómeno se ha consolidado en metodologías ampliamente usadas, como el enfoque de Neher y McGrath, adoptado y extendido en normas y guías técnicas [10–12]. En paralelo, la transferencia de calor entrega fundamentos para comprender los mecanismos dominantes (conducción, convección y radiación) y su impacto en configuraciones reales [13]. En proyectos mineros, donde el diseño busca confiabilidad y eficiencia, el control térmico y la correcta selección de conductores se vuelven factores relevantes de desempeño y costo.

1.1. Descripción del problema

La selección de conductores en proyectos industriales, especialmente mineros, requiere evaluar simultáneamente múltiples restricciones técnicas. Entre ellas destacan la capacidad de conducción de corriente, la caída de tensión en régimen permanente y durante transitorios relevantes, y la capacidad térmica ante cortocircuito. En la práctica, estas verificaciones se aplican a grandes volúmenes de circuitos (alimentadores, motores y servicios auxiliares), bajo métodos de instalación variados y con marcos normativos distintos según el cliente y la ubicación del proyecto. Cuando el proceso se apoya en planillas Excel internas, aparecen dificultades recurrentes. La lógica de cálculo queda distribuida entre hojas, celdas y macros, lo que complica la validación de supuestos, el registro de cambios y la consistencia entre versiones. Además, incorporar nuevas configuraciones (por ejemplo, variaciones en bancos de ductos o escenarios térmicos más exigentes) suele exigir modificaciones manuales que no siempre quedan documentadas. Esto incrementa el riesgo de subdimensionamiento (sobretensión, degradación acelerada de la aislación y reducción de vida útil) o sobredimensionamiento (aumento innecesario de CAPEX y costos de instalación).

En minería, estas brechas se amplifican por dos razones. Primero, la criticidad operacional: la indisponibilidad de alimentadores puede impactar producción, bombeo, ventilación o transporte de mineral. Segundo, la complejidad térmica de canalizaciones reales: el agrupamiento en ductos puede generar acumulación térmica significativa. En estos casos, los factores tabulados no siempre representan con precisión la geometría y condiciones particulares, especialmente si existen restricciones de espacio o ventilación no estándar.

En este escenario, se plantea el desarrollo de una herramienta computacional orientada a es-

tandarizar y automatizar la selección de conductores en sistemas de distribución, con foco en media y baja tensión para Hatch Chile. La plataforma propuesta, denominada HARS (Hatch Ampacity Rating Software), utiliza una planilla Excel como interfaz de entrada y salida de datos. El cálculo se ejecuta en Python mediante módulos especializados y una interfaz gráfica de usuario (GUI). Con ello se busca mantener la familiaridad y universalidad de Excel, junto con la robustez, extensibilidad y control de versiones de un entorno de programación moderno. En cuanto a la información de carga y demanda, el alcance de HARS parte desde datos ya definidos por la ingeniería del proyecto (por ejemplo, hojas de datos y tablas de cargas). En proyectos desarrollados por Hatch Chile, estos insumos suelen construirse con criterios internos y referencias de práctica recomendada para sistemas industriales [14]. En consecuencia, el trabajo se centra en la selección del conductor a partir de dicha información, asumiendo conocidas las características básicas de los equipos a alimentar.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar e implementar HARS (Hatch Ampacity Rating Software), una herramienta computacional que estandarice la selección de conductores eléctricos de media y baja tensión en proyectos mineros de Hatch Chile, integrando marcos normativos IEC, NE-C/NFPA y RIC, y considerando criterios de ampacidad, caída de tensión, capacidad de cortocircuito, derrateos térmicos y generación de reportes.

1.2.2. Objetivos específicos

- Sistematizar la metodología normativa para selección de conductores en baja y media tensión, incorporando criterios IEC (ampacidades tabuladas y modelos analíticos), NE-C/NFPA (tablas y factores aplicables) y requisitos locales asociados a los pliegos técnicos RIC.
- Definir la arquitectura de software y el modelo de datos de la plataforma (motor de cálculo, interfaz gráfica y estructura de entrada/salida en Excel), asegurando trazabilidad de supuestos, parámetros y resultados.
- Implementar los módulos principales de verificación y selección: ampacidad (tablas y criterios IEC/NEC), caída de tensión en régimen permanente y durante partida de motor, y verificación térmica ante cortocircuito bajo un enfoque adiabático, con normalización de calibres en IEC (mm^2) y NEC (AWG/kcmil).
- Integrar un post-procesador de resultados para generar reportes en Excel, incluyendo advertencias y supuestos de cálculo.

- Implementar un módulo de análisis térmico bidimensional por elementos finitos orientado a configuraciones subterráneas (bancos de ductos) para estimar la distribución de temperaturas y contrastar resultados con criterios tabulados y analíticos.
- Incorporar un módulo de comparación económica de conductores, basado en CAPEX y OPEX (pérdidas), para analizar alternativas de calibre en un horizonte de evaluación y apoyar decisiones de eficiencia energética.
- Validar la herramienta mediante casos de aplicación en contextos de ingeniería de proyectos, comparando resultados con planillas internas y con software comercial, identificando discrepancias, limitaciones y oportunidades de mejora.

1.3. Alcances y limitaciones

El trabajo se orienta a la selección de conductores en media y baja tensión para instalaciones industriales-mineras, con salida de resultados en formato Excel y operación mediante una GUI. El alcance considera:

- Cálculo y selección de conductores a partir de datos de carga ya definidos por ingeniería (potencia, tensión, factor de potencia, longitud y método de instalación, entre otros).
- Aplicación de criterios IEC, NEC/NFPA y RIC para ampacidad, factores de corrección, caída de tensión y verificación de cortocircuito.
- Análisis térmico detallado para configuraciones complejas (bancos de ductos y tiros/chimeneas), como complemento al enfoque tabulado/analítico.
- Evaluación económica opcional para contrastar el calibre mínimo técnico con alternativas superiores.

Entre las principales limitaciones se encuentra la dependencia de la calidad de los datos de entrada del proyecto. También se considera la simplificación inherente a modelos 2D en ciertos escenarios térmicos complejos, y una cobertura normativa acotada a los estándares priorizados. Extensiones como modelos 3D, integración directa con plataformas BIM o automatización completa de la estimación de demanda quedan fuera del alcance principal y se proponen como trabajo futuro.

1.4. Metodología general

La metodología se estructura en cuatro etapas:

1. Levantamiento normativo y definición de criterios de cálculo: recopilación de factores, tablas y reglas de selección, junto con supuestos técnicos para estandarizar el proceso.

2. Implementación computacional: desarrollo del motor de cálculo en Python y de la interfaz gráfica, definiendo la estructura de entrada/salida en Excel y asegurando coherencia entre módulos.
3. Integración del análisis térmico: implementación del flujo por elementos finitos para casos subterráneos y verticales, orientado a cuantificar derrateos en configuraciones complejas.
4. Validación y contraste: ejecución de casos de prueba, comparación con herramientas existentes y revisión de resultados, documentando desempeño, limitaciones y posibles mejoras.

1.5. Estructura del documento

El documento se organiza en seis capítulos. El Capítulo 1 presenta el contexto, la motivación del tema, la problemática y los objetivos del trabajo. El Capítulo 2 desarrolla el marco teórico para la selección de conductores, abordando fundamentos térmicos y criterios normativos aplicables en baja y media tensión, además de los conceptos que sustentan el análisis térmico en canalizaciones complejas.

El Capítulo 3 describe las herramientas computacionales utilizadas, incluyendo el entorno de programación, librerías, estructura de datos y software complementario requerido para el análisis térmico y la distribución del aplicativo. El Capítulo 4 detalla la plataforma implementada HARS, su arquitectura, los módulos principales y el flujo operativo entre la GUI, el motor de cálculo y los reportes.

El Capítulo 5 presenta la implementación y validación mediante casos de estudio, comparaciones con referencias internas y herramientas comerciales, y análisis de consistencia técnica. Finalmente, el Capítulo 6 sintetiza conclusiones, contribuciones y líneas de trabajo futuro orientadas a ampliar el alcance y robustez de la herramienta.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Selección de conductores en instalaciones industriales

En ingeniería de potencia y distribución, la selección de conductores es parte del diseño eléctrico. Su objetivo es compatibilizar seguridad, desempeño y viabilidad constructiva. En términos prácticos, *conductor* se refiere al elemento metálico que transporta la corriente (cobre o aluminio). En cambio, *cable* alude al conjunto completo, incluyendo conductor, aislación, pantallas, cubiertas y elementos de protección.

La normativa y las guías técnicas formulan el problema a nivel de cable. Esto se debe a que el límite operativo está definido por la temperatura máxima admisible del sistema de aislación y por la capacidad del entorno de instalación para evacuar el calor generado. En aplicaciones industriales mineras, el proceso se repite para un gran número de circuitos y bajo configuraciones de instalación diversas. Por ello, el análisis se apoya en entradas mínimas que aparecen de forma recurrente: tensión nominal, tipo de carga, corriente de diseño, longitud del alimentador, método de instalación (bandeja, ducto, enterrado directo, banco de ductos, etc.), temperatura ambiente o del suelo, y condiciones de agrupamiento.

A partir de estas variables se verifican restricciones normativas y de desempeño. Luego se selecciona una sección transversal normalizada que satisfaga simultáneamente los criterios aplicables.

2.1.1. Rol de los conductores y variables de diseño

El conductor es un componente crítico porque define la capacidad de transporte de corriente y las pérdidas por efecto Joule. Sin embargo, su selección no depende solo del material o del área nominal (en mm^2 o AWG/kcmil en el caso norteamericano). En la práctica interviene un conjunto de variables:

- **Material del conductor:** cobre o aluminio, con distinta resistividad eléctrica y comportamiento térmico.
- **Sistema de aislación y temperatura máxima admisible:** define el límite térmico de operación y condiciona la ampacidad.
- **Tensión nominal y construcción del cable:** determina requisitos de aislación, pantallas y cubiertas, especialmente en media tensión.

- **Método de instalación y medio térmico:** aire, ducto, enterrado directo o banco de ductos, además de rellenos térmicos y resistividad térmica del suelo.
- **Agrupamiento y geometría:** número de cables en proximidad, disposición (plano o trébol), separación y grado de confinamiento.
- **Longitud y parámetros eléctricos:** influyen en caída de tensión y pérdidas, con impacto en desempeño y costos operacionales.

Estas variables delimitan el problema. Para una misma corriente de carga, una instalación con peor disipación térmica o mayor agrupamiento suele exigir una sección superior. A la inversa, para una misma sección, la temperatura de operación y el margen térmico dependen del entorno de instalación.

2.1.2. Métodos de instalación y su influencia en la selección del conductor

El método de instalación define el entorno físico del cable y condiciona los criterios de selección. Aun cuando el cable sea el mismo, el mecanismo dominante de disipación puede cambiar. En aire, el intercambio con el ambiente es directo. En conductos, aparece confinamiento. En instalaciones subterráneas, domina la conducción hacia el suelo.

En instalaciones industriales es habitual clasificar los circuitos según canalizaciones típicas. Las configuraciones más comunes son:

- **Instalación en aire:** cables expuestos o en bandejas (por ejemplo, bandeja tipo escalerilla). El intercambio con el ambiente suele ser favorable frente a configuraciones confinadas. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.1.

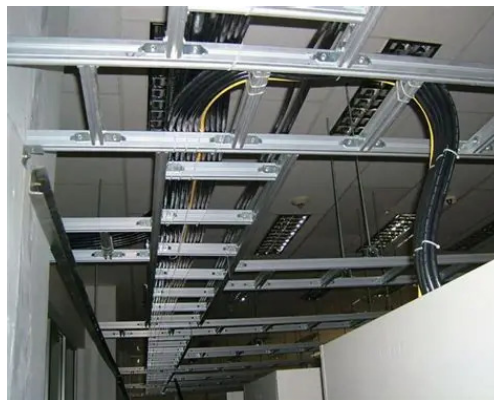


Figura 2.1: Ejemplo de instalación en aire tipo ladder. Fuente: [15].

- **Instalación en conductos montados:** cables en tubos o conduits fijados a muros o estructuras. El confinamiento puede exigir factores de ajuste más restrictivos, especialmente con agrupamiento. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.2.

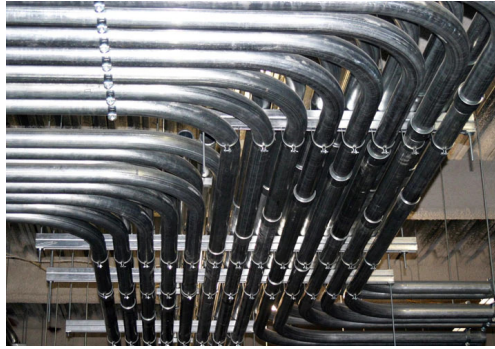


Figura 2.2: Ejemplo de instalación tipo conducto montado. Fuente: [16].

- **Instalación subterránea:** cables enterrados directamente o dispuestos en ductos. La disipación queda condicionada por propiedades térmicas del suelo o relleno, profundidad de enterramiento y proximidad entre circuitos. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Ejemplo de instalación subterránea directamente enterrada. Fuente: [17].

- **Banco de ductos:** arreglo de ductos múltiples en un mismo volumen de obra civil. En esta configuración aparece interacción térmica entre ductos, lo que vuelve más sensible la selección a variables geométricas del banco y propiedades térmicas del medio circundante. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4: Ejemplo de instalación tipo banco de ductos. Fuente: [18].

En consecuencia, identificar el método de instalación es una entrada base del problema. Esta elección determina qué tablas y factores de corrección se deben aplicar. Además, permite anticipar si el circuito se encuentra dentro de configuraciones típicas o si puede requerir un análisis térmico más específico.

2.1.3. Corriente de diseño del circuito

El dimensionamiento requiere fijar una corriente representativa del servicio del circuito. En este trabajo se utiliza la corriente de diseño I_B , entendida como la corriente asociada a la demanda esperada en régimen permanente bajo las condiciones de operación especificadas. En esta definición pueden incorporarse márgenes del proyecto, como factores de demanda o simultaneidad.

Para cargas trifásicas equilibradas, si se conoce la potencia activa P y el factor de potencia $\cos \varphi$, la corriente de diseño se obtiene como:

$$I_B = \frac{P}{\sqrt{3} V_{LL} \cos \varphi \eta}, \quad (2.1)$$

donde V_{LL} es la tensión línea-línea y η representa una eficiencia global cuando P corresponde a potencia útil (por ejemplo, en motores). Si P corresponde a potencia eléctrica de entrada, puede adoptarse $\eta = 1$.

De manera análoga, para cargas monofásicas:

$$I_B = \frac{P}{V \cos \varphi \eta}, \quad (2.2)$$

donde V es la tensión fase-neutro.

Cuando la información disponible se expresa como potencia aparente S (kVA), la corriente de diseño se calcula como:

$$I_B = \frac{S}{\sqrt{3} V_{LL}} \quad (\text{trifásico}), \quad I_B = \frac{S}{V} \quad (\text{monofásico}). \quad (2.3)$$

En alimentadores con conductores en paralelo por fase (N_{SC}), se adopta un reparto ideal de corriente:

$$I_{\text{cond}} = \frac{I_B}{N_{SC}}, \quad (2.4)$$

lo que permite utilizar I_{cond} en expresiones de pérdidas por conductor y en la evaluación eléctrica equivalente.

La definición de I_B establece la magnitud base para verificar simultáneamente: (i) ampacidad ($I_B \leq I_{\text{adm}}$), (ii) regulación de tensión, y (iii) el conjunto de restricciones descritas en las secciones posteriores.

2.1.4. Restricciones técnicas típicas: ampacidad, caída de tensión y cortocircuito

La selección de conductores se plantea como una verificación simultánea de restricciones. En la práctica, tres criterios concentran la mayor parte de las decisiones:

1. **Ampacidad** (límite térmico en régimen permanente): corresponde a la máxima corriente admisible sin superar la temperatura límite del cable. Está determinada por las pérdidas internas y por la red de resistencias térmicas hacia el medio circundante. En guías industriales se enfatiza su rol central. Los valores tabulados entregan aproximaciones útiles, mientras que configuraciones complejas pueden requerir un análisis más detallado [19].
2. **Regulación/Caída de tensión:** limita la reducción de tensión a lo largo del alimentador para asegurar operación adecuada de equipos, eficiencia y cumplimiento de requisitos internos o normativos [7]. Depende de la corriente, la longitud y la impedancia del circuito. Se evalúa en régimen permanente y, cuando corresponde, en condiciones particulares como la partida de motores.
3. **Capacidad térmica ante cortocircuito** (evento transitorio): verifica que el conductor soporte, durante el tiempo de despeje de la protección, el esfuerzo térmico asociado a una corriente de falla. Este criterio se formula típicamente bajo una hipótesis adiabática, asociando el incremento de temperatura a la energía I^2t .

Además de estos criterios, existen restricciones complementarias que suelen ser relevantes en ingeniería de detalle. Entre ellas destacan la compatibilidad con protecciones y canalizaciones, límites de ocupación en ductos o bandejas, requisitos de construcción e identificación, y condiciones ambientales específicas. La normativa local también establece requisitos de seguridad para conductores y sistemas de canalización en instalaciones de consumo, lo que enmarca la selección desde la perspectiva de cumplimiento [8].

2.2. Fundamentos electro-térmicos de la ampacidad

La ampacidad (corriente máxima admisible en régimen permanente) es la corriente que un cable puede transportar sin que la temperatura del conductor o del sistema de aislación supere un límite de diseño. En la práctica, el límite térmico lo define la aislación (por ejemplo, 90°C en cables típicos con XLPE o EPR en operación continua). La ampacidad resulta del equilibrio entre el calor generado por pérdidas eléctricas y el calor evacuado hacia el entorno mediante transferencia térmica.

En términos físicos, el cálculo es un problema acoplado: la corriente fija las pérdidas, las pérdidas determinan el campo de temperatura, y la temperatura modifica parámetros eléctricos (en particular la resistencia del conductor). Esta realimentación explica por qué la ampacidad depende tanto del cable como del método de instalación. Dado que resolver el problema exacto implica ecuaciones diferenciales (por ejemplo, la ecuación de calor), los organismos normativos han desarrollado formulaciones analíticas y valores tabulados para configuraciones típicas. Antes de introducir esos métodos, se presentan las relaciones básicas que sustentan el fenómeno.

2.2.1. Balance térmico en régimen permanente y definición de ampacidad

En estado estacionario, el balance térmico se expresa como una igualdad entre la potencia disipada por unidad de longitud en el cable y la potencia transferida hacia el medio circundante. Una forma simple de interpretar el aumento de temperatura del conductor es mediante una resistencia térmica equivalente:

$$\Delta T = T_c - T_a \approx P_\ell(I) R_{th,eq}, \quad (2.5)$$

donde T_c es la temperatura del conductor, T_a la temperatura del medio de referencia (ambiente o suelo), P_ℓ la pérdida total por unidad de longitud en W/m, y $R_{th,eq}$ una resistencia térmica equivalente en K m/W o °C m/W. Esta formulación es útil como aproximación conceptual. En métodos normativos, el sistema se modela con redes de resistencias térmicas y términos de pérdidas diferenciados por componente.

La ampacidad se obtiene imponiendo el límite térmico $T_{m\acute{a}x}$ definido por la aislación. Por tanto, el problema se interpreta como encontrar la corriente I tal que:

$$T_c(I) = T_{m\acute{a}x}. \quad (2.6)$$

2.2.2. Pérdidas eléctricas relevantes en cables de potencia

Las pérdidas internas constituyen la fuente térmica del problema. En régimen permanente, las contribuciones más relevantes son:

- **Pérdidas en el conductor (Joule):** $P_{cu} = I^2 R_{ac}$, donde R_{ac} es la resistencia en corriente alterna por unidad de longitud a la temperatura de operación.
- **Pérdidas dieléctricas en la aislación:** asociadas al campo eléctrico alterno, comúnmente expresadas como

$$W_d = \omega C V_{fn}^2 \tan(\delta), \quad (2.7)$$

donde ω es la frecuencia angular, C la capacitancia por unidad de longitud, V_{fn} la tensión fase–neutro y $\tan(\delta)$ la tangente de pérdidas.

- **Pérdidas en pantallas, vainas o armaduras:** originadas por corrientes inducidas y circulación de corriente de retorno, dependientes de la construcción del cable y del esquema de puesta a tierra.

En esta memoria se adopta, como hipótesis de trabajo, que la pérdida dominante es la componente Joule en el conductor. Esta aproximación es razonable en muchos casos de baja tensión y en alimentadores donde el objetivo principal es evaluar la limitación térmica por corriente. En media tensión, las pérdidas adicionales pueden ser relevantes según la construcción y el nivel de tensión, por lo que su inclusión se considera una extensión futura.

2.2.3. Resistencia del conductor y dependencia con la temperatura

La resistencia eléctrica del conductor varía con la temperatura. Una aproximación usual es el modelo lineal:

$$R_{dc}(T) = R_{dc}(T_0) [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (2.8)$$

donde $R_{dc}(T_0)$ es la resistencia DC a la temperatura de referencia T_0 (típicamente 20°C) y α es el coeficiente de temperatura del material. Esta dependencia explica la realimentación electro-térmica: a mayor temperatura, aumenta la resistencia y se incrementan las pérdidas Joule para una misma corriente.

2.2.4. Efectos adicionales en la resistencia AC: skin y proximidad

En corriente alterna, la resistencia efectiva puede exceder la resistencia DC debido a fenómenos electromagnéticos. El efecto *skin* concentra la corriente hacia la periferia del conductor. El efecto *proximidad* surge por la influencia de campos magnéticos generados por conductores cercanos, lo que distorsiona la distribución de corriente y eleva las pérdidas. Ambos efectos dependen de la frecuencia, la geometría del conductor y la disposición de fases.

Una formulación habitual expresa:

$$R_{ac}(T) = R_{dc}(T) (1 + y_s + y_p), \quad (2.9)$$

donde y_s representa el incremento por *skin* y y_p el incremento por proximidad. Para conductores cilíndricos, estos términos pueden escribirse como:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}, \quad (2.10)$$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4}} + 0.27 \right], \quad (2.11)$$

con:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_s, \quad x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_p, \quad (2.12)$$

donde k_s y k_p son factores de corrección y f es la frecuencia en Hz. En forma alternativa, la resistencia puede expresarse desde parámetros geométricos mediante:

$$R = \frac{L}{\sigma A_c}, \quad (2.13)$$

donde A_c es el área de sección transversal del conductor, σ es la conductividad eléctrica y L una longitud de referencia. La conductividad puede aproximarse como dependiente de temperatura mediante:

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T - T_0)}. \quad (2.14)$$

2.2.5. Ecuación de calor y formulación estacionaria

El análisis térmico se sustenta en la conservación de energía aplicada a un medio continuo. Usando la ley de Fourier y asumiendo material homogéneo e isotrópico, se obtiene la ecuación de difusión de calor. En forma transiente:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}, \quad (2.15)$$

donde ρ es la densidad, c_p el calor específico, k la conductividad térmica, T la temperatura y $\dot{q}$ la generación volumétrica de calor en W/m^3 . En régimen permanente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = 0. \quad (2.16)$$

Para cables suficientemente largos, suele asumirse que los gradientes longitudinales son despreciables. Así, el problema se aproxima como bidimensional y se resuelve sobre una sección transversal. En ese caso, las pérdidas por unidad de longitud se incorporan como una fuente volumétrica equivalente en el dominio del conductor.

Si la pérdida dominante es Joule, la potencia disipada por unidad de longitud es:

$$P_{\ell, \text{cu}} = I^2 R_{\text{ac}}, \quad (2.17)$$

y una aproximación común considera una fuente uniforme en el conductor:

$$\dot{q}_{\text{cu}} = \frac{P_{\ell, \text{cu}}}{A_c} = \frac{I^2 R_{\text{ac}}}{A_c}, \quad (2.18)$$

donde A_c es el área de la sección del conductor. Esta expresión conecta el problema eléctrico (pérdidas) con el problema térmico (campo de temperaturas).

Para cerrar el modelo se requieren condiciones de borde. Las más utilizadas son:

- **Dirichlet (temperatura impuesta):** $T = T_a$ en una frontera lejana que represente ambiente o suelo.
- **Robin (convectiva):** $-k \partial T / \partial n = h (T - T_\infty)$, para representar intercambio con un fluido.

2.2.6. Mecanismos de transferencia de calor y resistencias térmicas equivalentes

La evacuación de calor desde el cable hacia el entorno ocurre por conducción, convección y radiación. En muchos problemas de ampacidad se utiliza una representación de parámetros concentrados, donde el sistema se modela con nodos térmicos y resistencias equivalentes. Esta aproximación permite relacionar pérdidas por unidad de longitud con el aumento de temperatura del conductor de forma compacta.

2.2.6.a. Conducción

La conducción describe la transferencia de calor en sólidos y en fluidos inmóviles. Su ecuación constitutiva es la ley de Fourier:

$$\vec{q} = -k\nabla T. \quad (2.19)$$

Bajo flujo unidimensional y estacionario, se obtienen resistencias térmicas equivalentes:

- **Pared plana** de espesor L y área A :

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA}. \quad (2.20)$$

- **Cilindro** (capas concéntricas) entre radios r_1 y r_2 , por unidad de longitud:

$$R'_{\text{cond}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k}. \quad (2.21)$$

- **Esfera** (capas concéntricas) entre radios r_1 y r_2 :

$$R_{\text{cond}} = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k}. \quad (2.22)$$

Estas expresiones son aplicables al camino térmico interno del cable (conductor–aislación–cubiertas) y, de manera aproximada, a medios externos como ductos, rellenos u hormigón cuando la geometría admite una simplificación.

2.2.6.b. Convección

La convección corresponde al intercambio de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento. Se modela mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A (T_s - T_{\infty}), \quad (2.23)$$

donde h_{conv} es el coeficiente convectivo, T_s es la temperatura superficial y T_{∞} la temperatura del fluido. La resistencia convectiva equivalente es:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h_{\text{conv}} A}. \quad (2.24)$$

2.2.6.c. Radiación

La radiación térmica es la emisión de energía electromagnética asociada a la temperatura. Para una superficie gris difusa:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4), \quad (2.25)$$

donde ε es la emisividad, σ la constante de Stefan–Boltzmann y T_{alred} una temperatura efectiva del entorno.

Es posible definir un coeficiente radioactivo equivalente:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} A (T_s - T_{\text{alred}}), \quad h_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_s + T_{\text{alred}}) (T_s^2 + T_{\text{alred}}^2), \quad (2.26)$$

y así:

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{h_{\text{rad}} A}. \quad (2.27)$$

En instalaciones expuestas, convección y radiación suelen actuar en paralelo sobre la misma superficie. Por ello se define un coeficiente exterior combinado:

$$h_{\text{comb}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}, \quad R_{\text{comb}} = \frac{1}{h_{\text{comb}} A}. \quad (2.28)$$

2.2.6.d. Circuitos térmicos equivalentes

En régimen estacionario, el flujo de calor puede escribirse como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} = \frac{T_2 - T_1}{R_{\text{th}}}, \quad (2.29)$$

lo que es análogo a la ley de Ohm ($\Delta V = IR$). Con esta analogía es posible utilizar reglas de combinación y balances nodales equivalentes a circuitos eléctricos. Las resistencias térmicas se combinan como:

- Serie: $R_{\text{eq}} = \sum_i R_i$.
- Paralelo: $\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$.

En el contexto de un cable en canalización, se distingue típicamente:

- una contribución interna $R_{\text{th,int}}$, asociada a las capas del cable;
- una contribución externa $R_{\text{th,ext}}$, asociada al medio de instalación (aire, ducto, suelo, etc.).

En forma conceptual:

$$R_{\text{th,eq}} = R_{\text{th,int}} + R_{\text{th,ext}}. \quad (2.30)$$

La Figura 2.5 muestra un circuito térmico típico para un cable, donde el flujo de calor generado en el conductor se evacúa hacia el entorno a través de resistencias en serie y/o paralelo.

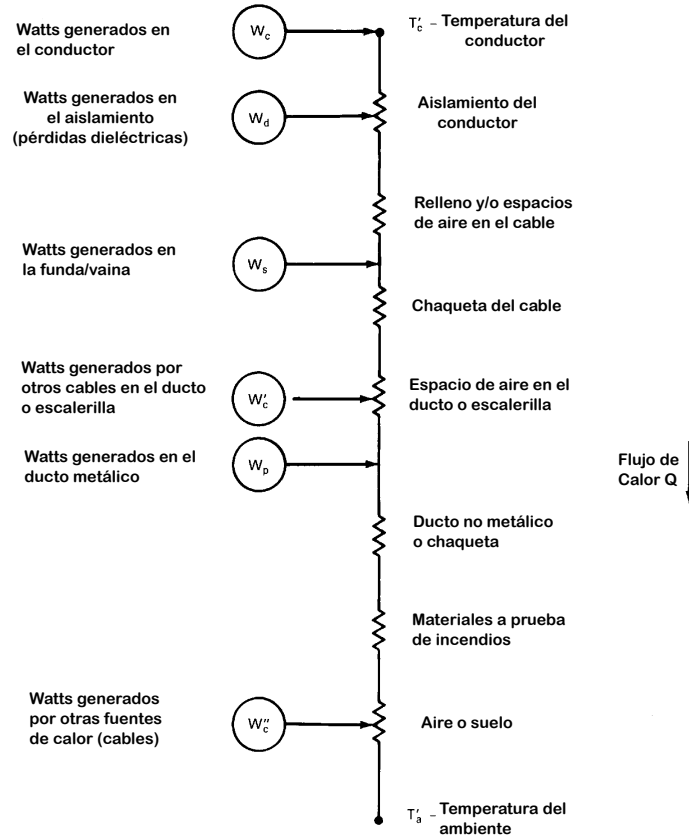


Figura 2.5: Circuito térmico típico para un conductor en canalización. Adaptado de [19].

Esta representación explica por qué el entorno puede dominar la ampacidad aun cuando el cable sea el mismo. Por ejemplo, un aumento de resistividad térmica del suelo o una convección interna débil en un ducto incrementan $R_{th,ext}$, elevan T_c para una misma pérdida y reducen la corriente admisible. La Tabla 2.1 resume las equivalencias fundamentales.

Variable	Representación eléctrica	Representación térmica
Potencial	Potencial eléctrico V [V]	Temperatura T [K]
Flujo	Corriente I [A]	Flujo de calor $\dot{Q}$ [W]
Resistencia	Resistencia R [Ω]	Resistencia térmica R_{th} [K/W]
Ley de elemento	$\Delta V = IR$	$\Delta T = \dot{Q}R_{th}$

Tabla 2.1: Analogía entre redes eléctricas y térmicas.

En síntesis, el transporte de calor desde el conductor al entorno se modela habitualmente con redes de resistencias térmicas equivalentes. Esta aproximación es eficiente para configuraciones típicas. En casos de mayor complejidad geométrica, dado el acoplamiento térmico, puede ser necesario resolver la ecuación de calor con sus condiciones de borde, lo que aumenta el esfuerzo computacional pero permite estimar la temperatura en cualquier punto del dominio.

2.3. Métodos normativos tabulados para la estimación de ampacidad

En ingeniería de instalaciones, la ampacidad se estima habitualmente mediante tablas normativas y factores de corrección. Este enfoque se utiliza porque permite obtener resultados consistentes en configuraciones típicas, sin resolver explícitamente el problema térmico distribuido. En este trabajo se consideran tres marcos de referencia: IEC, NEC (NFPA 70) y, para aplicación local, los pliegos técnicos RIC.

El procedimiento tabulado se apoya en dos pasos. Primero, se selecciona una corriente base I_{tab} asociada a un método de instalación y a condiciones de referencia definidas por la norma. Segundo, se ajusta ese valor con factores que representan desviaciones respecto del caso tabulado (temperatura del medio, agrupamiento, canalización, enterramiento, entre otros). En forma general:

$$I_{\text{perm}} = I_{\text{tab}} \cdot \prod_{j=1}^n k_j, \quad (2.31)$$

donde k_j son factores adimensionales (típicamente ≤ 1). El criterio térmico se satisface cuando la corriente de diseño cumple:

$$I_B \leq I_{\text{perm}}. \quad (2.32)$$

La Figura 2.6 ilustra, de manera conceptual, cómo los factores corrigen un valor base para representar condiciones reales de instalación.

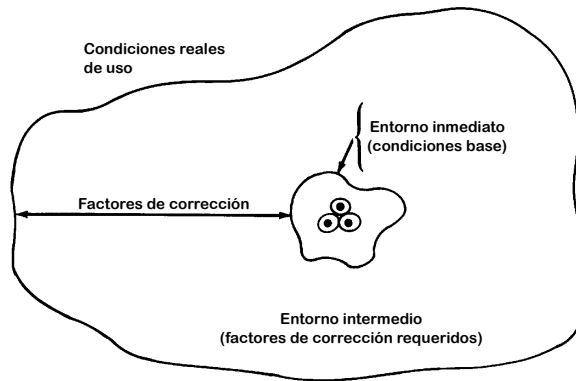


Figura 2.6: Representación esquemática del uso de factores de corrección para ajustar un valor tabulado de ampacidad. Adaptado de [19].

2.3.1. Tablas y factores bajo normativa IEC

En el marco IEC, los valores tabulados se sustentan en modelos térmicos equivalentes (redes de resistencias térmicas) y en formulaciones analíticas normalizadas para cables de potencia, formalizadas en la serie IEC 60287 [20, 21]. En términos operativos, la selección en baja y media tensión se apoya principalmente en tablas de corriente admisible por sección y método de instalación, complementadas con factores de corrección.

Para baja tensión (hasta 1kV), la norma IEC 60364-5-52 [22] entrega valores I_{tab} por calibre y método de instalación, considerando dimensiones típicas de cable (por ejemplo, IEC 60502-1 [23]) y resistencias tabuladas (por ejemplo, IEC 60228 [24]). Estas tablas se entregan bajo condiciones de referencia, típicamente:

- temperatura ambiente: 30 °C,
- temperatura del suelo: 20 °C,
- resistividad térmica del suelo: 2.5 K m/W.

Para media tensión (hasta 36kV), la norma IEC 60502-2 [25] mantiene el mismo enfoque tabulado, con condiciones de referencia equivalentes, pero con supuestos térmicos subterráneos que pueden diferir según el alcance de la tabla (por ejemplo, resistividad térmica típica de 1.5 K m/W en ciertos escenarios de instalación subterránea).

En el uso práctico, la corrección puede representarse como:

$$I_{\text{perm}} = I_{\text{tab}} \cdot k_T \cdot k_G \cdot k_M, \quad (2.33)$$

donde k_T corrige por temperatura del medio, k_G corrige por agrupamiento o proximidad de circuitos, y k_M agrupa correcciones asociadas al método de instalación cuando la condición real se aparta del caso tabulado.

Las tablas y factores IEC utilizados en esta memoria se incluyen en los Anexos A.1, A.2, B.1 y B.2.

2.3.2. Tablas y factores en el marco NEC (NFPA 70)

En el contexto norteamericano, el NEC (NFPA 70) entrega tablas de ampacidad y reglas de ajuste para conductores y cables de uso industrial. La base histórica del enfoque térmico para instalaciones subterráneas se asocia al método de Neher–McGrath [10], el cual modela el equilibrio térmico mediante resistencias equivalentes entre el conductor y el entorno.

En la práctica de ingeniería, la aplicación se realiza de forma tabulada: se selecciona I_{tab} desde el Artículo 310 [11] según el tipo de conductor/cable, temperatura nominal de aislación, condición de instalación representada por la tabla y número de conductores portadores de corriente (*current-carrying conductors*). Luego se aplican factores de corrección, típicamente por temperatura ambiente y por cantidad de conductores portadores de corriente. Una representación compacta es:

$$I_{\text{perm}} = I_{\text{tab}} \cdot k_T \cdot k_{\text{CCC}}, \quad (2.34)$$

donde k_T corrige por temperatura ambiente cuando difiere de la condición de referencia de la tabla y k_{CCC} ajusta por número de conductores portadores de corriente en la canalización o agrupamiento.

Para referencia, el NEC adopta condiciones base típicas del uso tabulado, por ejemplo:

- temperatura ambiente: 40 °C,
- temperatura del suelo: 20 °C,
- resistividad térmica del suelo: 0.9 K m/W.

Las tablas y factores NEC utilizados se presentan en los Anexos A.4 y B.4.

2.3.3. Aplicación en Chile: RIC N°04

En Chile, el pliego técnico RIC N°04 [8] enmarca criterios de selección de conductores en instalaciones de consumo, basándose en valores y criterios coherentes con referencias IEC (por ejemplo, IEC 60364-5-52, IEC 60502 y IEC 60228). La ampacidad permisible se obtiene a partir de una corriente tabulada y factores de corrección por número de conductores y por temperatura:

$$I_{\text{perm}} = I_t \cdot f_n \cdot f_t, \quad (2.35)$$

donde I_t es la corriente tabulada, f_n es el factor de corrección por cantidad de conductores en la canalización y f_t es el factor de corrección por temperatura del medio.

Las tablas y factores asociados a la normativa local se incluyen en los Anexos A.3 y B.3.

2.4. Modelación térmica en canalizaciones complejas

Los métodos tabulados de ampacidad son adecuados mientras la instalación pueda representarse mediante condiciones de referencia y factores de corrección (Sección 2.3). Cuando existe confinamiento geométrico, alta densidad de circuitos o acoplamiento térmico relevante, la disipación deja de ser bien representada por una única resistencia externa equivalente. En esos casos conviene utilizar una formulación distribuida, basada en la ecuación de calor estacionaria (2.16) con condiciones de borde representativas del entorno.

En esta memoria se prioriza el caso de bancos de ductos subterráneos, donde la conducción en suelo/relleno y el calentamiento mutuo entre ductos dominan el comportamiento térmico.

2.4.1. Bancos de ductos: acoplamiento térmico y sensibilidad geométrica

En un banco de ductos, el campo térmico está gobernado principalmente por conducción en el conjunto ducto–relleno–suelo. La cercanía entre ductos genera calentamiento mutuo. Esto produce distribuciones de temperatura no uniformes. En particular, posiciones interiores tienden a operar a mayor temperatura que posiciones perimetrales. Además, variables geométricas como la separación entre ductos, el diámetro del ducto, la profundidad de enterramiento y las dimensiones del banco modifican el camino de disipación. A ello se suman las propiedades térmicas del relleno y del suelo, normalmente descritas por su resistividad térmica.

La Figura 2.7 ilustra, de forma conceptual, los aportes de calor y su propagación en un banco de ductos.

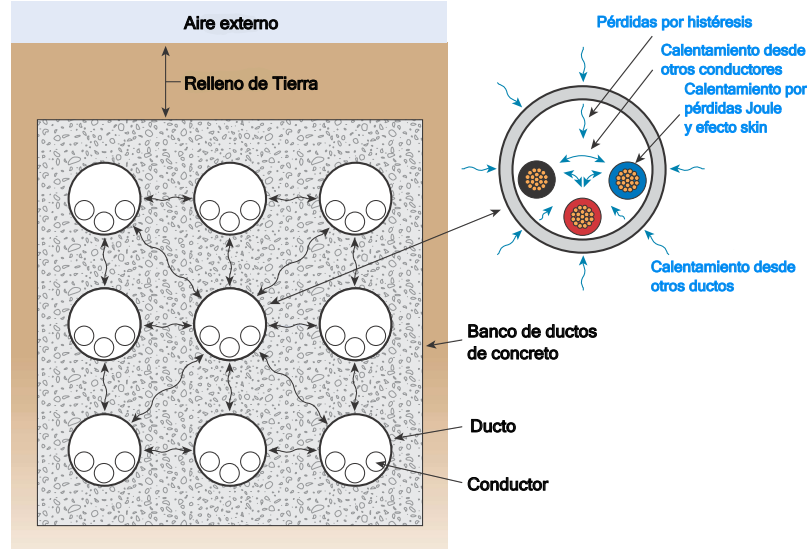


Figura 2.7: Fuentes y propagación de calor en cables instalados en banco de ductos. Adaptada de [26].

Desde el punto de vista normativo, la IEC 60287-2-1 descompone la resistencia térmica externa para instalación en ductos como [21]:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4, \quad (2.36)$$

donde T'_4 representa el intercambio en el medio interior del ducto (aire entre cable y pared interna), T''_4 corresponde a la conducción en el material del ducto y T'''_4 representa la conducción hacia el exterior (relleno/suelo), incorporando interacción térmica mediante superposición.

La contribución interior del ducto se expresa como [21]:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0.1 (V + Y\theta_m) D_e}, \quad (2.37)$$

donde U , V y Y son coeficientes definidos por la norma según la configuración, θ_m es una temperatura media del aire (temperatura de película) y D_e es el diámetro externo del cable.

La expresión (2.37) captura el efecto del confinamiento y una dependencia con temperatura. Sin embargo, no explicita los mecanismos físicos que gobiernan el intercambio en cavidades, como convección natural y radiación. En ductos con aire confinado, ambos mecanismos pueden aportar una fracción relevante del flujo térmico, dependiendo del gradiente térmico y de las propiedades superficiales [13,27,28]. Por esta razón, en configuraciones específicas o restrictivas, es habitual complementar el enfoque tabulado con un modelo distribuido.

Para el ducto, la conducción radial puede aproximarse mediante una resistencia cilíndrica:

$$T''_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right), \quad (2.38)$$

donde D_o y D_d son los diámetros externo e interno del ducto y ρ_T es la resistividad térmica del material del ducto en K m/W.

Para el medio externo y el calentamiento mutuo, la IEC utiliza una resistencia equivalente basada en el método de imágenes y superposición [21]:

$$T_4''' = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left\{ \left(\frac{2L}{D_e} + \sqrt{\left(\frac{2L}{D_e} \right)^2 - 1} \right) \left[\prod_{p=1}^q \frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right] \right\}, \quad (2.39)$$

donde ρ_c es la resistividad térmica del relleno en Km/W, L es la distancia desde la superficie al eje del cable, y d'_{pq} , d_{pq} son distancias geométricas asociadas al método de imágenes. En presencia de rellenos con propiedades distintas al suelo circundante (por ejemplo, concreto), la norma incorpora correcciones adicionales bajo condiciones geométricas específicas [21].

En el marco norteamericano, la IEEE reporta factores de ajuste para bancos de ductos calculados con Neher-McGrath, aplicables a bancos de hasta 4 filas y 15 columnas [19]. Estos factores se utilizan junto con las ampacidades tabuladas del NEC (Sección 2.3.2). Las tablas utilizadas en esta memoria se incluyen en el Anexo B.5.

2.4.2. Intercambio en cavidades: convección natural interna y radiación en el anillo de aire

En ductos con aire confinado, el intercambio térmico entre la superficie del cable y la pared interna no se explica únicamente por conducción en aire estático. A medida que crece el gradiente térmico, la flotabilidad induce movimiento del fluido y aumenta la transferencia de calor. En paralelo, existe intercambio por radiación entre superficies a distinta temperatura, con dependencia no lineal en T^4 [13, 28]. Ambos efectos son difíciles de representar con una única resistencia externa. Por ello, para análisis de mayor fidelidad, se recurre a formulaciones explícitas o a representaciones equivalentes.

2.4.2.a. Convección natural interna

La convección natural se cuantifica mediante los números de Rayleigh y Prandtl:

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu \alpha}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (2.40)$$

donde g es la gravedad, β es el coeficiente de expansión térmica, ν es la viscosidad cinemática y α es la difusividad térmica del aire. Estas propiedades se evalúan usualmente a la temperatura de película $T_f = (T_s + T_\infty) / 2$. La longitud característica L_c representa la escala dominante del intercambio (por ejemplo, un espesor equivalente del anillo de aire).

El incremento convectivo puede expresarse mediante el número de Nusselt:

$$Nu = \frac{h_{\text{conv}} L_c}{k_{\text{air}}}, \quad (2.41)$$

donde h_{conv} es el coeficiente convectivo promedio y k_{air} es la conductividad del aire. La estimación de Nu se realiza con correlaciones en función de Ra y Pr , seleccionadas según geometría y

orientación [13, 27]. Para un anillo de aire aproximado como cilindros concéntricos, una forma reportada en la literatura es la correlación de Raithby y Hollands [29]:

$$Nu = 0.386 \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (F_{\text{cil}} Ra)^{1/4}, \quad (2.42)$$

donde F_{cil} es un factor geométrico que depende de la razón de diámetros del anillo.

2.4.2.b. Radiación entre cilindros concéntricos

El intercambio radioactivo neto entre la superficie externa del cable y la pared interna del ducto, aproximadas como superficies cilíndricas concéntricas largas, puede expresarse como [28]:

$$\dot{Q}'_{\text{rad}} = \frac{\sigma A'_1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{D_1}{D_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.43)$$

donde $\dot{Q}'_{\text{rad}}$ es la potencia por unidad de longitud en W/m, σ es la constante de Stefan–Boltzmann en W/m²K⁴, A'_1 es el área radioactiva por unidad de longitud de la superficie del cable ($A'_1 = \pi D_1$), ε_1 y ε_2 son emisividades, y D_1 , D_2 son los diámetros de cable y ducto. En esta geometría el factor de vista entre superficies concéntricas es unitario.

De manera análoga a la convección, se define un coeficiente radioactivo equivalente:

$$h_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon_{\text{eff}} (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2), \quad (2.44)$$

con ε_{eff} dado por:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{D_1}{D_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (2.45)$$

Así, el flujo radioactivo puede escribirse como $q''_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} (T_1 - T_2)$, útil para combinarlo con convección en modelos equivalentes.

2.4.2.c. Representación mediante conductividad térmica efectiva

En el anillo de aire, convección y radiación actúan en paralelo. Una aproximación práctica, compatible con un modelo difusivo, consiste en reemplazar el aire por un medio con conductividad térmica efectiva. Para la parte convectiva:

$$k_{\text{conv}} = Nu k_{\text{air}}. \quad (2.46)$$

Para incorporar radiación como mecanismo equivalente en el mismo espacio, puede definirse una conductividad efectiva asociada:

$$k_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} L_c, \quad (2.47)$$

de modo que:

$$k_{\text{eff,air}} = k_{\text{conv}} + k_{\text{rad}}. \quad (2.48)$$

Esta representación no reemplaza la física del flujo interno. Entrega una forma operativa de capturar el aumento de transferencia en modelos 2D estacionarios.

2.4.3. Fundamento de la formulación 2D por elementos finitos

Cuando la configuración incluye múltiples ductos y calentamiento mutuo relevante, resulta apropiado resolver la ecuación de calor estacionaria sobre un dominio compuesto por materiales con distinta conductividad térmica. En una sección transversal 2D:

$$\nabla \cdot (k(\mathbf{x}) \nabla T(\mathbf{x})) + \dot{q}(\mathbf{x}) = 0, \quad (2.49)$$

donde $k(\mathbf{x})$ se define por subdominio (conductor, aislación, aire con $k_{\text{eff,air}}$, ducto, relleno y suelo) y $\dot{q}(\mathbf{x})$ representa la generación volumétrica en el conductor.

La formulación débil se obtiene multiplicando por una función de prueba v e integrando sobre el dominio Ω [30]:

$$\int_{\Omega} k \nabla T \cdot \nabla v \, d\Omega + \int_{\Gamma_h} h T v \, d\Gamma = \int_{\Omega} \dot{q} v \, d\Omega + \int_{\Gamma_N} \bar{q}_n v \, d\Gamma + \int_{\Gamma_h} h T_{\infty} v \, d\Gamma, \quad (2.50)$$

donde Γ_N representa fronteras con flujo impuesto ($-k \partial T / \partial n = \bar{q}_n$) y Γ_h fronteras convectivas (condición de Robin) con un fluido a temperatura T_{∞} .

Al discretizar el dominio y aproximar $T(\mathbf{x}) \approx \sum_i T_i N_i(\mathbf{x})$, la formulación conduce a un sistema algebraico:

$$\mathbf{K} \mathbf{T} = \mathbf{F}, \quad (2.51)$$

donde $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez térmica y $\mathbf{F}$ agrupa fuentes volumétricas y términos de borde.

Si $k_{\text{eff,air}}$ depende de temperatura (por propiedades del aire o por $h_{\text{rad}}(T)$) o si $\dot{q}$ depende de T (por $R_{\text{AC}}(T)$), el problema es no lineal. En tal caso, $\mathbf{K}$ y/o $\mathbf{F}$ dependen de la solución y se busca una solución consistente del acoplamiento electro-térmico.

El resultado de interés para la estimación de ampacidad es la temperatura máxima del conductor:

$$T_{c,\text{máx}} = \max_{\mathbf{x} \in \Omega_c} T(\mathbf{x}), \quad (2.52)$$

la cual permite comparar posiciones dentro del banco (ductos interiores versus exteriores) y evaluar sensibilidad frente a geometría, resistividad térmica del relleno y condiciones de intercambio dentro del ducto.

2.5. Criterios eléctricos complementarios para la selección de conductores

Además del cumplimiento térmico en régimen permanente (ampacidad), la selección de conductores debe asegurar niveles de tensión adecuados en bornes de las cargas y verificar la capacidad térmica del conductor ante eventos de cortocircuito. En la práctica, estos criterios se evalúan junto con la selección tabulada o analítica de ampacidad, ya que pueden convertirse en la restricción dominante, especialmente en alimentadores largos o en cargas motrices.

2.5.1. Regulación de tensión

La caída de tensión a lo largo de un alimentador debe mantenerse dentro de márgenes que aseguren el desempeño de equipos y el cumplimiento de requisitos del proyecto o de la normativa aplicable. En este trabajo se evalúan dos escenarios: (i) operación en régimen permanente, aplicable a cualquier tipo de carga, y (ii) partida de motor, aplicable a cargas motrices cuando se dispone de parámetros mínimos del equipo.

En ausencia de requisitos específicos del cliente, se consideran como referencia los límites usuales en instalaciones de consumo. El RIC N°03 establece que la caída de tensión por corriente máxima no exceda 3% en alimentadores y subalimentadores, y que la caída total hasta el punto más desfavorable no exceda 5% [7]. Para el arranque de motores, se acepta tradicionalmente una caída transitoria mayor, del orden de 15%, como criterio de diseño preliminar [19].

2.5.1.a. Regulación en régimen permanente

Para el cálculo de la caída de tensión en régimen permanente se utiliza una formulación basada en [22], considerando la contribución resistiva y reactiva del alimentador:

$$\Delta V_{rp} = b I_B \frac{L}{N_{SC}} (R_c \cos \varphi + X_c \sin \varphi) \quad [\text{V}], \quad (2.53)$$

donde I_B es la corriente de diseño, L es la longitud del alimentador y N_{SC} es el número de conductores en paralelo por fase. Los parámetros R_c y X_c corresponden a resistencia y reactancia por unidad de longitud (Ω/m), tabuladas a frecuencia industrial. El ángulo φ se asocia al factor de potencia de la carga. El factor b representa el tipo de circuito ($b = 1$ trifásico y $b = 2$ monofásico).

La regulación en régimen permanente se expresa como porcentaje de la tensión nominal:

$$\text{Reg}_{rp} = \left| \frac{\Delta V_{rp}}{V_{nom}} \right| \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.54)$$

donde V_{nom} es la tensión nominal en la barra de alimentación del circuito. En la Figura 2.8 se presenta el circuito usado para la estimación.

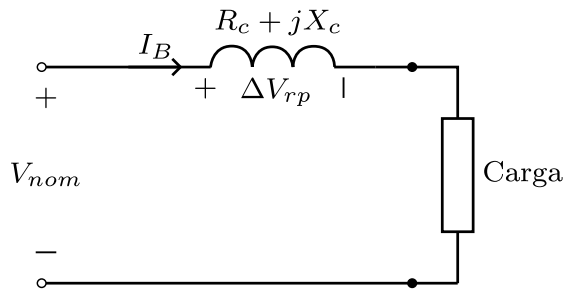


Figura 2.8: Circuito equivalente para el cálculo de caída de tensión en régimen permanente. Elaboración propia.

2.5.1.b. Regulación durante partida de motor

Durante la partida, un motor de inducción puede demandar una corriente transitoria del orden de $k_I = I_P/I_N$, lo que incrementa la caída de tensión en los elementos del sistema. Una caída excesiva puede provocar mal funcionamiento de equipos sensibles a subtensión, disparos de protecciones o dificultad de arranque, considerando que el torque electromagnético depende fuertemente del nivel de tensión en bornes.

Para etapas preliminares de diseño, se emplea un modelo simplificado que aproxima la condición de partida mediante una impedancia equivalente del motor y aplica un divisor de tensión con la impedancia del cable. Para un motor trifásico, se aproxima la impedancia de partida como:

$$Z_p = \frac{V_{LL}^2 \cos(\phi) \eta}{k_I P_n} \quad [\Omega], \quad (2.55)$$

donde V_{LL} es la tensión nominal línea-línea, P_n es la potencia nominal, $\cos(\phi)$ es el factor de potencia nominal, η es la eficiencia y k_I es la relación de corrientes en partida. Para separar componentes resistiva y reactiva en el arranque se utiliza el factor de potencia durante la partida $\cos(\phi_s)$:

$$R_p = Z_p \cos(\phi_s), \quad (2.56)$$

$$X_p = Z_p \sin(\phi_s) = Z_p \sqrt{1 - \cos^2(\phi_s)}. \quad (2.57)$$

La impedancia del cable se modela como $Z_c = (R_c + jX_c) L/N_{SC}$. La caída sobre el cable, por divisor de tensión, se expresa como:

$$\Delta V_p = V \frac{Z_c}{Z_c + Z_p}, \quad (2.58)$$

y la regulación durante partida como:

$$\text{Reg}_p = \left| \frac{\Delta V_p}{V} \right| \cdot 100 = \frac{L}{N_{SC}} \sqrt{\frac{R_c^2 + X_c^2}{\left(\frac{L}{N_{SC}} R_c + R_p \right)^2 + \left(\frac{L}{N_{SC}} X_c + X_p \right)^2}} \cdot 100 \quad [\%]. \quad (2.59)$$

El resultado entrega un criterio práctico para filtrar calibres en etapas de ingeniería. No representa un análisis dinámico completo, ya que asume impedancias constantes y no incorpora explícitamente variaciones temporales de tensión y corriente durante el transitorio. En estudios de mayor detalle conviene incluir impedancia de fuente y elementos aguas arriba (transformadores, barras y alimentadores previos), y utilizar herramientas de simulación especializadas (por ejemplo, ETAP o DIgSILENT PowerFactory).

2.5.2. Capacidad térmica frente a cortocircuitos

Los niveles de corriente de cortocircuito disponibles pueden ser elevados en sistemas industriales. Por ello, además de cumplir con ampacidad y regulación, el conductor debe soportar

térmicamente una falla hasta que actúen las protecciones, evitando exceder límites permisibles del material y del sistema de aislación.

Para fallas de corta duración se adopta típicamente una hipótesis adiabática: durante el intervalo de cortocircuito, el calor generado se almacena principalmente en el metal conductor y la transferencia hacia el entorno se desprecia. Esto conduce a formulaciones del tipo I^2t que relacionan corriente de falla, tiempo de despeje y área requerida. En esta memoria se consideran dos referencias de uso extendido: IEEE 242 e IEC 60364-4-43.

2.5.2.a. Criterio adiabático según IEEE 242

IEEE 242 expresa el criterio térmico mediante [31]:

$$\left(\frac{I}{S}\right)^2 (t F_{ac}) = 0.0297 \cdot \log_{10} \left(\frac{T_f + 234}{T_o + 234} \right), \quad (2.60)$$

$$\Rightarrow S = \sqrt{\frac{I^2 t F_{ac}}{0.0297 \cdot \log_{10} \left(\frac{T_f + 234}{T_o + 234} \right)}}, \quad (2.61)$$

donde I es la corriente de falla en [A], S es el área transversal en [mm²], t es la duración del cortocircuito en [s], F_{ac} es un factor asociado a efectos AC, T_o es la temperatura inicial y T_f es la temperatura final admisible en [°C].

2.5.2.b. Criterio adiabático según IEC 60364-4-43

IEC 60364-4-43 propone una formulación simplificada para tiempos de despeje de hasta 5 s [32]:

$$\sqrt{t} = k \cdot \frac{S}{I}, \quad (2.62)$$

$$\Rightarrow S = \frac{I \sqrt{t}}{k}, \quad (2.63)$$

donde k es un coeficiente tabulado que incorpora propiedades del material y el rango térmico considerado (temperatura inicial y final).

2.5.2.c. Uso del criterio en la selección del calibre

Para una corriente de falla I_{cc} y un tiempo de despeje t , se determina un área mínima $S_{\min,cc}$ que evita exceder T_f partiendo desde T_o . En consecuencia, un calibre puede cumplir por ampacidad y regulación, pero resultar insuficiente si no satisface el criterio térmico de cortocircuito.

2.5.3. Selección del calibre como problema de restricciones

Los criterios anteriores se integran naturalmente como un problema de selección bajo restricciones. La variable de decisión es el calibre S , elegido desde un conjunto discreto de alternativas

normalizadas y disponibles. Sea S_{disp} el conjunto de áreas transversales disponibles. La selección técnica se expresa como la búsqueda del mínimo calibre que satisface simultáneamente:

$$\frac{I_B}{N_{SC}} \leq I_{\text{adm}}(S, \text{instalación}, N_{SC}, \dots), \quad (2.64)$$

$$\text{Reg}_{\text{rp}}(S, N_{SC}) \leq \text{Reg}_{\text{rp}, \text{máx}}, \quad (2.65)$$

$$\text{Reg}_p(S, N_{SC}) \leq \text{Reg}_{p, \text{máx}}, \quad (\text{solo si aplica partida}) \quad (2.66)$$

$$S \geq S_{\text{mín,cc}}(I_{\text{cc}}, t, T_o, T_f). \quad (2.67)$$

Bajo este enfoque, el calibre técnico mínimo se define como:

$$S^* = \min \{S \in S_{\text{disp}} : \text{se cumplen (2.64)–(2.67)}\}. \quad (2.68)$$

En la implementación real, algunas restricciones se activan solo cuando aplican. Por ejemplo, la partida se evalúa únicamente para cargas tipo motor, y los conductores en paralelo se representan mediante N_{SC} en ampacidad y caída de tensión.

2.6. Evaluación económica del ciclo de vida de los conductores

Una vez identificadas las alternativas de conductor que cumplen las restricciones técnicas (Sección 2.5.3), puede incorporarse un criterio económico para comparar soluciones igualmente viables desde el punto de vista eléctrico y térmico. En alimentadores industriales de alta potencia, las pérdidas por efecto Joule pueden representar un costo operativo acumulado relevante, ya que escalan cuadráticamente con la corriente y linealmente con la resistencia del conductor. En consecuencia, aumentar la sección transversal reduce pérdidas y costos de energía disipada, pero incrementa el costo de inversión e instalación. Este compromiso se evalúa mediante un enfoque de costo total equivalente en un horizonte de evaluación, siguiendo el marco de la IEC 60287-3-2 [33].

Para mantener consistencia con los criterios técnicos desarrollados previamente, la evaluación económica se entiende como un post-proceso: se aplica solo sobre calibres que ya cumplen ampacidad, regulación de tensión y cortocircuito. De este modo, el criterio económico no reemplaza exigencias de seguridad, sino que apoya decisiones de eficiencia energética y costo total.

2.6.1. Costo total equivalente y componentes

De acuerdo con [33], el costo total equivalente se expresa como:

$$CT = CI + CJ, \quad (2.69)$$

donde CI es el costo de inversión/instalación y CJ es el costo equivalente, en valor presente, asociado a las pérdidas por efecto Joule durante el periodo de evaluación.

2.6.2. Costo equivalente de pérdidas CJ

Para un circuito con N_p conductores de fase por circuito y N_c circuitos equivalentes, la potencia disipada por pérdidas Joule se expresa como:

$$P_{\text{loss}} = I^2 R_L L N_p N_c, \quad [\text{W}], \quad (2.70)$$

donde I es una corriente representativa, R_L es la resistencia AC por unidad de longitud $[\Omega/\text{m}]$, y L es la longitud del alimentador $[\text{m}]$.

Dado que la corriente real varía durante el año, la IEC introduce el *tiempo equivalente anual a máxima pérdida* T , definido como:

$$T = \mu \cdot 8760, \quad [\text{h/año}], \quad (2.71)$$

donde μ es el factor de pérdidas de carga (relación entre pérdidas promedio y pérdidas a corriente máxima). Con ello, la energía anual perdida se aproxima como $E_{\text{loss,anual}} \approx P_{\text{loss,máx}} T$, utilizando una corriente máxima representativa $I_{\text{máx}}$.

Si P es el costo unitario de la energía $[\text{cu/Wh}]$, el costo anual asociado a pérdidas resulta:

$$C_{\text{loss,anual}} = \left(I_{\text{máx}}^2 R_L L N_p N_c \right) (T \cdot P) \quad [\text{cu/año}]. \quad (2.72)$$

Para llevar estos costos a valor presente e incorporar tendencias de crecimiento (por ejemplo, incremento de carga y de precio de energía), la IEC 60287-3-2 introduce un factor acumulativo Q [33]. En consecuencia, el costo equivalente de pérdidas se expresa como:

$$CJ = \left(I_{\text{máx}}^2 R_L L N_p N_c \right) (T \cdot P) \left(\frac{Q}{1 + i/100} \right), \quad [\text{cu}], \quad (2.73)$$

donde i es la tasa de descuento anual en % y Q corresponde a la suma geométrica:

$$Q = \sum_{n=1}^N \left(r^{n-1} \right) = \frac{1 - r^N}{1 - r}, \quad (2.74)$$

con N el horizonte de evaluación en años. El factor anual r agrupa incrementos esperados [33]:

$$r = \frac{(1 + a/100)^2 (1 + b/100) (1 + c/100)}{(1 + i/100)}, \quad (2.75)$$

donde a representa crecimiento anual de carga, b crecimiento anual del costo de energía y c un crecimiento anual adicional asociado a pérdidas (por ejemplo, por envejecimiento u otros supuestos del proyecto).

Para simplificar, los factores que no dependen del tamaño del conductor pueden agruparse en:

$$F = N_p N_c T P \left(\frac{Q}{1 + i/100} \right), \quad (2.76)$$

de modo que:

$$CT = CI + I_{\text{máx}}^2 R_L L F. \quad (2.77)$$

2.6.3. Modelo continuo para resistencia y costo de inversión

Para obtener una interpretación analítica del compromiso inversión–pérdidas, se representa R_L como función continua del área transversal S y CI como una relación afín con S . En primera aproximación:

$$R_L(S) = \frac{\rho_{20} B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{S} \cdot 10^6, \quad (2.78)$$

donde ρ_{20} es la resistividad a 20°C, α_{20} es el coeficiente de temperatura, θ_m es una temperatura representativa de operación en °C, y B agrupa el incremento de resistencia AC respecto de DC (incluyendo efectos de skin y proximidad, coherente con (2.9)). El factor 10^6 proviene de la conversión de unidades cuando S se expresa en mm^2 .

El costo de inversión se aproxima como:

$$CI(S) = L (A_S S + A_L) \quad [\text{cu}], \quad (2.79)$$

donde A_S es un coeficiente de costo variable con la sección y A_L es una componente fija por unidad de longitud asociada a instalación, terminaciones u otros costos que no escalan con S .

Reemplazando (2.78) y (2.79) en (2.77) se obtiene una expresión explícita $CT(S)$ que captura el compromiso económico bajo los supuestos adoptados.

2.6.4. Tamaño económico y proyección a calibres normalizados

En el modelo continuo, el tamaño económico S_{ec} se define como el valor de S que minimiza $CT(S)$. Al imponer la condición $dCT/dS = 0$ se obtiene:

$$S_{ec} = 1000 \sqrt{\frac{I_{\text{máx}}^2 F \rho_{20} B [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A_S}} \quad [\text{mm}^2]. \quad (2.80)$$

La expresión (2.80) muestra que S_{ec} aumenta con $I_{\text{máx}}$ y con el peso económico de las pérdidas (contenido en F), y disminuye cuando el costo incremental por sección (A_S) es elevado.

En aplicaciones reales, el conductor se selecciona desde un conjunto discreto de secciones normalizadas S_{disp} . Por ello, S_{ec} se interpreta como una referencia continua y el criterio económico se aplica comparando CT entre alternativas normalizadas cercanas. En esta memoria, la comparación económica se implementa como un contraste entre el calibre técnico mínimo y el inmediatamente superior, manteniendo los supuestos técnicos del caso base y evaluando la variación de CI , CJ y CT bajo el horizonte de evaluación definido.

Capítulo 3

Herramientas computacionales

Este capítulo describe las herramientas computacionales empleadas para implementar la aplicación. El desarrollo se basa en Python como lenguaje principal, debido a su capacidad para integrar cálculo numérico, manejo de datos y generación de reportes en un entorno único. Sobre esta base se incorpora una interfaz gráfica de escritorio para parametrización y ejecución, módulos de cálculo eléctrico y económico, y un componente de simulación térmica por elementos finitos para configuraciones subterráneas con confinamiento geométrico. El rol de cada componente se presenta de manera funcional. La descripción del flujo operativo y la arquitectura interna se aborda en el capítulo siguiente.

3.1. Lenguaje de desarrollo y bibliotecas de soporte

El núcleo de la herramienta se implementa en Python. Esta elección permite consolidar rutinas de cálculo, lectura y escritura de planillas, y trazabilidad del proceso en un mismo repositorio de código. Para cubrir necesidades específicas se utilizan bibliotecas de propósito general, ampliamente adoptadas en entornos de ingeniería:

- **NumPy**: operaciones vectorizadas y cómputo numérico eficiente. Se emplea para evaluar arreglos de alternativas de calibre y aplicar factores de corrección sin recurrir a bucles costosos [34].
- **Pandas**: lectura, transformación y escritura de datos tabulados. Permite trabajar con tablas normativas y resultados como `DataFrame`, facilitando filtrado, combinaciones y exportación estructurada [35].
- **SciPy**: rutinas numéricas complementarias, por ejemplo búsqueda de raíces o resolución de ecuaciones no lineales. Se utiliza cuando se requiere consistencia entre variables dependientes de temperatura en el modelado térmico [36].
- **Matplotlib**: generación de gráficos y su integración con la interfaz de escritorio. Se usa para visualizar resultados y apoyar la interpretación de configuraciones de cálculo [37].

Estas bibliotecas se seleccionan por su estabilidad, madurez, uso extendido en aplicaciones de ingeniería y compatibilidad con la distribución final como ejecutable.

3.2. Interfaz gráfica de usuario

La interfaz gráfica concentra la entrada de parámetros, reduce errores de digitación y define un punto único para ejecutar cálculos y exportar resultados. Su rol es coordinar los módulos de la aplicación y ordenar el flujo de uso. La lógica de ingeniería se mantiene fuera de la capa visual, con el fin de mejorar mantenibilidad y facilitar extensiones futuras.

La implementación se realiza con Qt mediante PySide6 [38]. Este entorno permite construir ventanas, formularios, validaciones de entrada y diálogos de archivos con un comportamiento consistente en aplicaciones de escritorio.

3.2.1. Estructura base de la ventana

Una aplicación típica en Qt se organiza a partir de los siguientes elementos:

- **QMainWindow:** ventana principal que incorpora barra de menús, barra de estado y un **centralWidget**. Esta estructura separa navegación, contenido y retroalimentación al usuario.
- **QWidget:** unidad básica de composición. Se utiliza para agrupar parámetros por secciones (por ejemplo, condiciones térmicas o método de instalación) y para construir componentes reutilizables.
- **Layouts (QVBoxLayout, QHBoxLayout, QGridLayout):** administración de la disposición de widgets sin coordenadas absolutas. Esto evita problemas de escalado y mantiene estabilidad ante cambios de tamaño de ventana.

3.2.2. Widgets principales utilizados

Para cada sección de parámetros se emplean widgets que refuerzan control y validación de la entrada:

- **QLabel:** muestra texto estático asociado a un campo. Se usa para rotular parámetros, advertencias o unidades. Un ejemplo de visualización en distintos sistemas operativos se presenta en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Ejemplo de QLabel en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].

- **QComboBox**: lista desplegable para seleccionar alternativas discretas (por ejemplo, norma aplicable o configuración de instalación). Evita entradas inválidas y estandariza opciones. Un ejemplo se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Ejemplo de QComboBox en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].

- **QSpinBox** y **QDoubleSpinBox**: entrada numérica acotada con control de mínimo, máximo, paso y formato. Se utiliza en parámetros como temperatura ambiente/suelo, resistividad térmica o límites de regulación. Un ejemplo se presenta en la Figura 3.3.

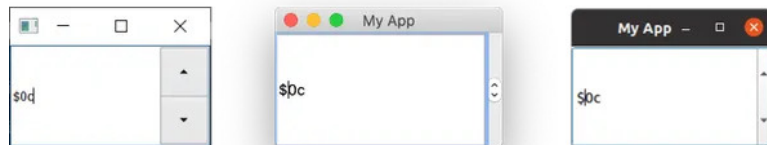


Figura 3.3: Ejemplo de QSpinBox en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].

- **QPushButton**: botón para acciones explícitas (importar datos, ejecutar cálculo, exportar resultados). Esta separación reduce ejecuciones accidentales y hace trazable el flujo de uso. Un ejemplo se muestra en la Figura 3.4.

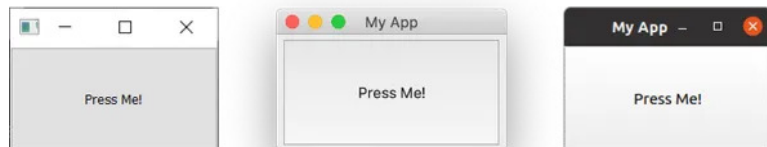
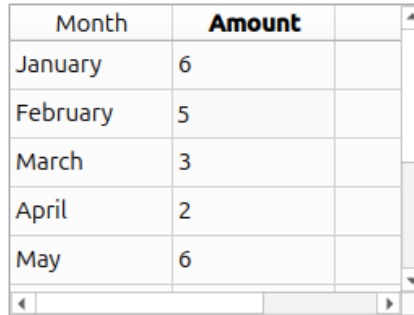


Figura 3.4: Ejemplo de QPushButton en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].

- **QTableWidget**: tabla para desplegar resultados de forma ordenada. Se usa para revisión rápida de variables de salida y cumplimiento de criterios. Un ejemplo se presenta en la Figura 3.5.



Month	Amount	
January	6	
February	5	
March	3	
April	2	
May	6	

Figura 3.5: Ejemplo de `QTableWidget` en distintos sistemas operativos. Fuente: [39].

3.2.3. Eventos y retroalimentación

Qt utiliza el mecanismo de señales y ranuras (`signals/slots`) para conectar eventos con lógica de control. Esto permite habilitar o deshabilitar campos según el contexto, actualizar parámetros dependientes y ejecutar rutinas al presionar botones.

La retroalimentación al usuario se implementa mediante:

- `QFileDialog`: selección de archivo de entrada y definición de carpeta o ruta de salida para la exportación.
- `QMessageBox`: mensajes de validación, error y notificación de término de proceso.
- `QStatusBar`: estado breve de la aplicación (archivo cargado, cálculo en curso, exportación completada).

3.3. Simulación térmica por elementos finitos: FEMM y enlace con Python

Para configuraciones donde las hipótesis tabuladas y sus factores de corrección no representan con suficiente fidelidad el comportamiento térmico (por ejemplo, bancos de ductos con acoplamiento relevante entre ductos), se incorpora una etapa de simulación térmica por elementos finitos.

3.3.1. FEMM como plataforma de elementos finitos

Finite Element Method Magnetics (FEMM) es un software orientado a problemas bidimensionales que incluye, entre otros módulos, un solver de flujo de calor estacionario (*Heat Flow*). El entorno integra herramientas de preproceso (definición de geometría, materiales, propiedades térmicas y condiciones de borde), generación de malla triangular y postproceso para visualizar y extraer resultados.

Además, FEMM incorpora capacidades de automatización mediante scripting, lo que facilita su uso en análisis repetitivos y parametrizados [40]. En el contexto de esta memoria, FEMM se utiliza como motor de cálculo térmico para resolver secciones transversales 2D y estimar temperaturas de operación bajo condiciones de instalación y carga definidas por el usuario.

3.3.2. PyFEMM: automatización y acoplamiento con el flujo de cálculo

PyFEMM es una biblioteca que permite operar FEMM desde Python mediante un conjunto de funciones que reflejan la interfaz de scripting del software. En un flujo típico, Python inicia una instancia de FEMM con `openfemm()`, crea o abre un documento térmico, construye la geometría, asigna materiales y condiciones de borde, ejecuta el análisis y extrae resultados. Finalmente, la sesión se cierra con `closefemm()` [41].

Esta automatización permite integrar la simulación térmica dentro del flujo general de la herramienta: la interfaz gráfica define parámetros, el motor en Python construye y parametriza el modelo FEM, FEMM resuelve el problema estacionario, y los resultados se retornan para su visualización y reporte. Dado que PyFEMM requiere que FEMM esté instalado y accesible en el equipo, la distribución de la herramienta considera este requisito dentro del procedimiento de instalación o del entorno objetivo.

3.4. Manejo de planillas y generación de resultados

La interfaz de entrada y salida del sistema se basa en planillas de cálculo, ya que en ingeniería de detalle es habitual recibir listados de cargas y circuitos en formato Excel y devolver resultados en el mismo medio. Para esto se emplean bibliotecas de Python orientadas a manejo tabular y edición de archivos:

- **Pandas**: lectura, limpieza y consolidación de datos tabulados, además del ensamblaje de tablas finales para exportación.
- **openpyxl**: escritura y edición de archivos Excel manteniendo estructura de hojas y formatos, permitiendo controlar propiedades del documento de salida y su trazabilidad [42].

Esta estrategia facilita que la herramienta se inserte en el flujo habitual de revisión y coordinación de proyectos, evitando que el usuario requiera software adicional para interpretar los resultados.

3.5. Distribución de la herramienta como ejecutable

El uso esperado de la herramienta es operativo: ejecutar estimaciones y exportar resultados sin requerir instalación manual de librerías, configuración de entornos especiales o ejecución de scripts. Por ello, la distribución se plantea mediante un ejecutable en Windows (`.exe`) que integra intérprete, dependencias y recursos asociados en una entrega autocontenida.

Para el empaquetado se utiliza PyInstaller [43] en modalidad `onedir`, que genera un ejecutable principal y una carpeta de soporte (por ejemplo, `internal`) con librerías, módulos y recursos requeridos durante la ejecución. Esta modalidad reduce tiempos de arranque frente a empaquetados unitarios (por ejemplo, `onefile`) y simplifica la gestión de recursos externos (imágenes, íconos, plantillas y tablas normativas).

Finalmente, para una instalación orientada a usuario final, se utiliza un generador de instaladores (por ejemplo, InstallForge [44]), que permite definir un asistente de instalación, accesos directos, copiado de recursos y procedimiento de desinstalación, de forma consistente con prácticas habituales de despliegue en entornos corporativos.

Capítulo 4

Descripción de la plataforma implementada

Los capítulos 2 y 3 presentan los fundamentos de cálculo y las herramientas computacionales utilizadas. En este capítulo se describe la plataforma implementada desde un punto de vista funcional: su organización interna, flujos de trabajo y principales entradas/salidas. El objetivo es explicitar cómo se procesa un listado de circuitos hasta obtener recomendaciones de calibre y reportes trazables, manteniendo separada la capa de interacción del usuario respecto del motor de cálculo.

La plataforma se organiza en dos componentes:

- **Front-end:** la interacción con el usuario se realiza mediante una interfaz gráfica (GUI), desde la cual se importan planillas, se parametrizan supuestos globales del proyecto y se ejecutan los módulos. Para referencia visual de las ventanas principales, se incluyen capturas en el Anexo F.
- **Back-end:** conjunto de rutinas de cálculo que procesan los datos de entrada, verifican restricciones y ensamblan resultados técnicos y reportes. Cuando la aproximación tabulada/analítica no representa adecuadamente una canalización subterránea, se integra una simulación térmica 2D por elementos finitos mediante FEMM enlazado con Python.

4.1. Descripción general de la plataforma

La herramienta dimensiona conductores de manera sistemática a partir de un listado de circuitos en planilla. Para cada fila calcula magnitudes eléctricas, verifica restricciones técnicas y propone un calibre normalizado. Además de entregar un calibre final, registra variables de respaldo por criterio, lo que facilita revisión y trazabilidad del resultado.

La Figura 4.1 resume el flujo general. La plataforma opera en dos líneas de trabajo: (i) selección técnica y, si se habilita, evaluación económica de alternativas; y (ii) análisis térmico detallado por elementos finitos para bancos de ductos, cuando se requiere caracterizar el acoplamiento térmico y la sensibilidad a parámetros geométricos y del medio.

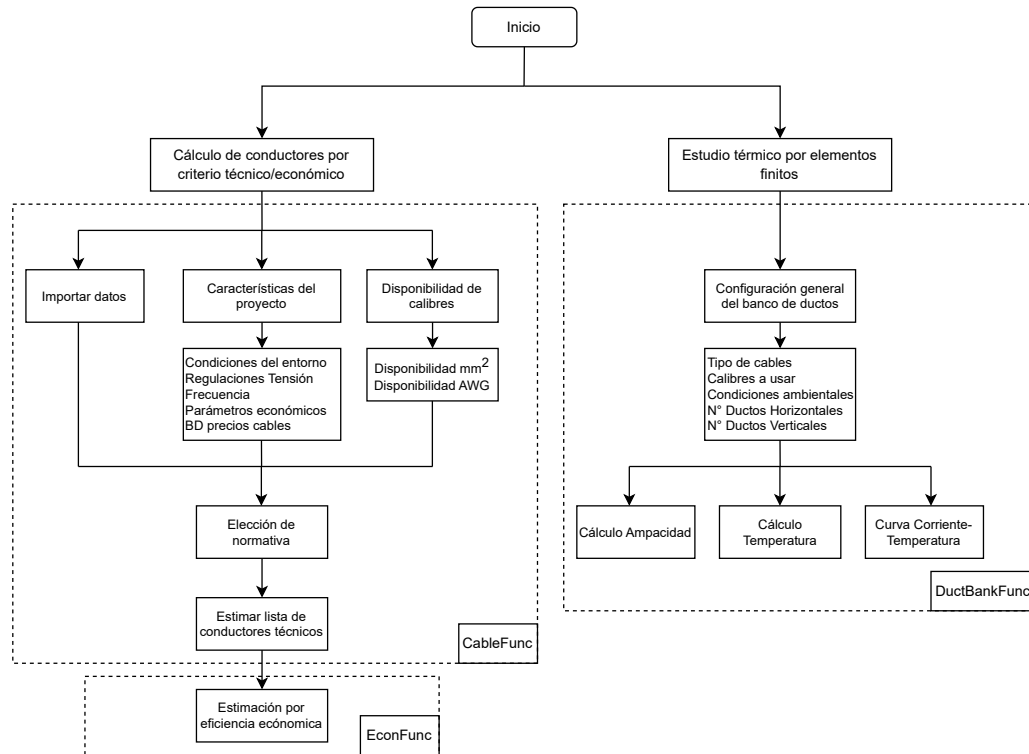


Figura 4.1: Esquema general de funcionalidades de la plataforma y sus ramas principales. Elaboración propia.

Para efectos de descripción se distinguen tres macromódulos funcionales:

- **CableFunc**: evaluación técnica del calibre. Incluye ampacidad normativa (con factores aplicables), caída de tensión en régimen permanente y, cuando corresponde, durante partida, además de verificación térmica ante cortocircuito. Su salida es el calibre técnico mínimo y las variables de respaldo por criterio.
- **EconFunc**: evaluación económica opcional sobre alternativas que ya cumplen técnicamente. Compara inversión inicial con costo equivalente de pérdidas por efecto Joule (IEC 60287-3-2) y determina si conviene aumentar sección respecto del calibre técnico mínimo.
- **DuctBankFunc**: parametriza la simulación térmica 2D en bancos de ductos ($N \times M$), incorporando geometría, separaciones, profundidad de enterramiento y propiedades térmicas del ducto, relleno y suelo.

4.1.1. Entradas y modelo de datos

La entrada principal corresponde a una planilla donde cada fila representa un circuito o carga, con variables típicas de dimensionamiento: tipo de carga, potencia y unidad, tensión nominal, factor

de potencia, longitud, método de canalización, y parámetros de falla (por ejemplo, corriente de cortocircuito y tiempo de despeje). Esta estructura permite procesar grandes volúmenes de circuitos bajo hipótesis consistentes.

Tras la importación, los datos se organizan en una estructura tabular interna que facilita tratamiento por columnas (unidades, campos opcionales y control de tipos), cálculo por fila y consolidación de resultados en un formato exportable. En paralelo, se definen parámetros globales del proyecto (por ejemplo, límites de regulación, condiciones térmicas, frecuencia, norma aplicable y criterios de disponibilidad comercial), que se aplican de forma transversal a todos los circuitos.

4.1.2. Flujo de selección técnica y evaluación económica

La selección se formula como un problema de restricciones: para cada circuito se evalúan los criterios activos y se identifica el calibre normalizado mínimo que cumple simultáneamente ampacidad, regulación de tensión y verificación ante cortocircuito, según corresponda. Esta etapa entrega además información que permite identificar el criterio dominante (el que gobierna el calibre final) y cuantificar márgenes.

Si el usuario habilita la evaluación económica, *EconFunc* compara el calibre técnico con alternativas superiores cercanas, cuantificando inversión y costo equivalente de pérdidas en un horizonte de evaluación. La recomendación final se entrega condicionada a la factibilidad técnica previa: el criterio económico no reemplaza las restricciones, sino que decide entre alternativas ya admisibles.

4.1.3. Estudio térmico por elementos finitos en bancos de ductos

Cuando se requiere representar en mayor detalle el comportamiento térmico en canalizaciones subterráneas, se incorpora un análisis 2D por elementos finitos. En esta línea, *DuctBankFunc* construye y resuelve la ecuación de calor sobre una sección transversal del banco, permitiendo evaluar acoplamiento térmico entre ductos, posiciones interiores versus perimetrales, y sensibilidad frente a parámetros geométricos y del medio.

Los resultados de esta línea pueden presentarse en tres tipos de salida, según el modo de estudio:

- Estimación de ampacidad: corriente admisible asociada a un límite térmico del conductor.
- Reporte térmico de la sección: campo de temperaturas y valores máximos relevantes.
- Curva corriente–temperatura (I–T): caracterización del comportamiento térmico de la canalización para un rango de corrientes.

4.1.4. Exportación y trazabilidad de resultados

Los resultados se ensamblan en planillas de salida con estructura predefinida, incorporando la recomendación de calibre y variables de respaldo por circuito. Esto facilita revisión, trazabilidad

y comparación entre alternativas cuando se activa la evaluación económica o el análisis térmico, manteniendo coherencia entre entradas, supuestos globales y salidas.

En conjunto, la Figura 4.1 define el marco del capítulo: primero se describe el flujo de selección técnico–económica a partir de la planilla de entrada, y luego la integración del análisis térmico 2D para bancos de ductos cuando la canalización requiere un tratamiento más específico.

4.2. Selección técnico–económica de conductores (CableFunc)

Esta sección describe la rama de selección de conductores basada en criterios técnicos y, de forma opcional, en evaluación económica por pérdidas. El propósito es transformar la información de cada circuito (fila de la planilla) en un conjunto de alternativas viables, identificando el calibre mínimo que cumple las restricciones activas y dejando registro de las magnitudes que sustentan la decisión.

Para mantener la descripción a nivel funcional (sin depender de detalles de implementación), se utiliza la siguiente separación conceptual: CableFunc concentra las verificaciones técnicas (ampacidad, caída de tensión y cortocircuito térmico), mientras que EconFunc compara alternativas técnicamente válidas para decidir si conviene aumentar sección por reducción de pérdidas (IEC 60287-3-2).

La Figura 4.2 resume la lógica del macromódulo de selección técnico–económica. En este flujograma y en los siguientes se utiliza la siguiente convención de colores:

- Bloque amarillo: proceso o cálculo interno.
- Bloque azul: información de entrada del flujo.
- Bloque verde: salida de la herramienta (típicamente reportes en planilla).
- Rombo naranja: decisión (usuario o sistema).
- Bloque rojo: inicio o término de un proceso.

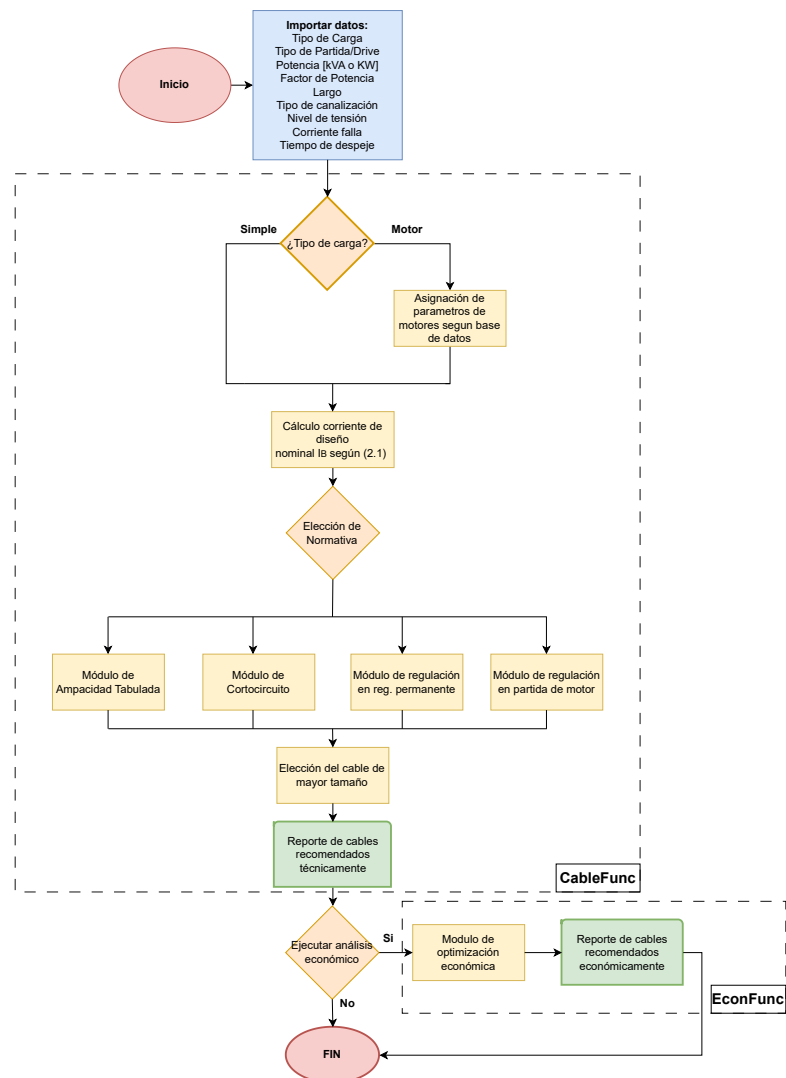


Figura 4.2: Lógica del macromódulo de selección técnico–económica de conductores. Elaboración propia.

4.2.1. Preprocesamiento de datos del circuito

Antes de evaluar los criterios, la plataforma normaliza la información de entrada con el objetivo de trabajar con registros consistentes entre circuitos y reducir dependencia de formato en la planilla:

- Normalización de unidades y validación de campos mínimos (tensión, longitud, potencia/corriente, método de canalización y parámetros de cortocircuito cuando apliquen).
- Cálculo de la corriente de diseño del circuito a partir de los datos disponibles (por ejemplo, potencia en kW o kV A, factor de potencia y eficiencia cuando corresponda).

- Clasificación del tipo de carga (carga general o motor) para habilitar, cuando aplique, la verificación de caída de tensión en partida.
- Estandarización de opciones discretas (normativa seleccionada, método de instalación, criterios de disponibilidad), de modo que cada fila quede asociada a un conjunto único de tablas, parámetros y factores.

La estructura de entrada por fila se resume en la Tabla 4.1. El formato de planilla de entrada y de salida responde a plantillas corporativas utilizadas para estandarizar el levantamiento y la trazabilidad de circuitos en proyectos; por ello se mantiene la estructura general de columnas, su nomenclatura y orden de presentación. Las capturas completas de las plantillas se incluyen en el Anexo E.1.

Input	Descripción
Tag de origen/destino	Nombre del tablero/barra de origen y de la carga de destino.
Tipo de carga	Carga general o motriz.
Tipo de partida/drive	Partida directa o con variador de frecuencia.
Potencia	Potencia de la carga en kW o kV A.
Factor de potencia	Factor de potencia de la carga.
Largo	Longitud estimada del tendido en m.
Tipo de canalización	Canalización/método de instalación del cable.
Nivel de tensión	Tensión nominal del circuito en V.
Corriente de falla estimada	Corriente de cortocircuito estimada para el nivel de tensión del circuito en kA.
Tiempo de despeje estimado	Tiempo de despeje asociado a la actuación de protecciones en s.

Tabla 4.1: Datos de entrada por circuito en la planilla corporativa.

La lógica mostrada en la Figura 4.2 se ejecuta fila a fila sobre esta estructura, manteniendo consistencia en la selección de tablas, factores y verificaciones.

4.2.2. Criterio de ampacidad normativa

El criterio de ampacidad determina el calibre mínimo capaz de transportar la corriente del circuito sin exceder la temperatura máxima admisible del cable, bajo el método de instalación indicado. La Figura 4.3 resume la lógica.

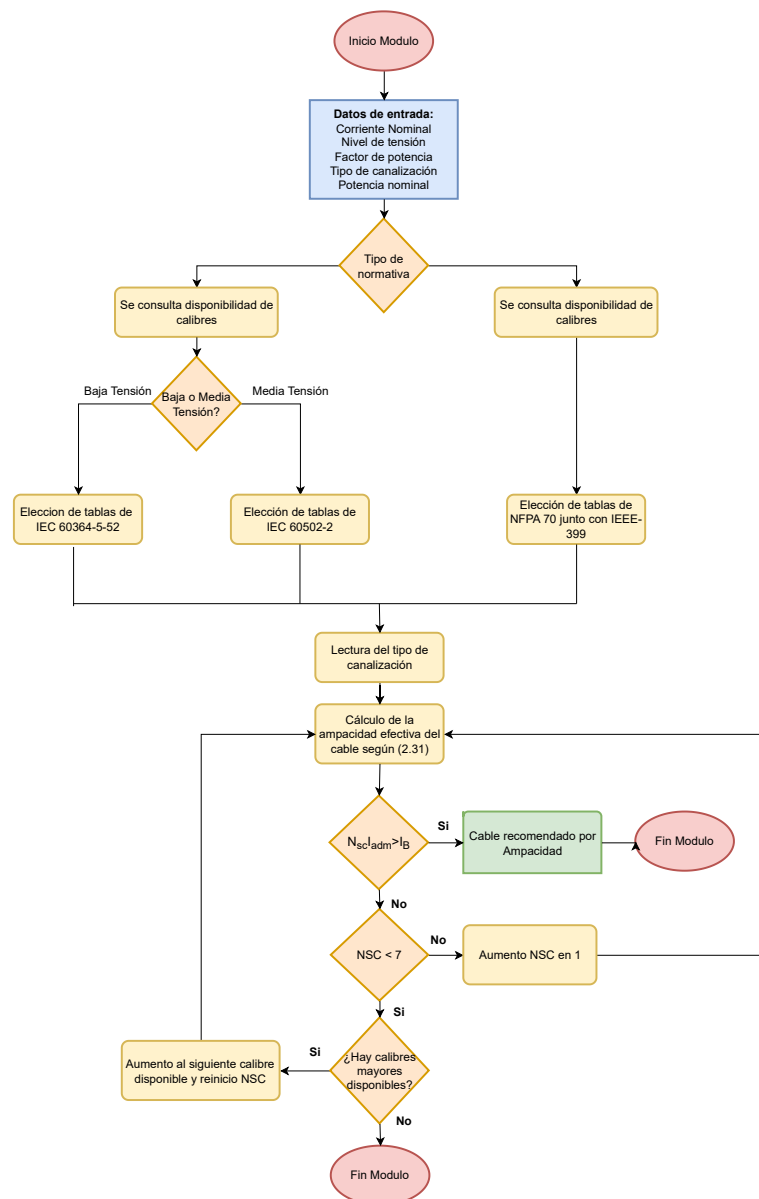


Figura 4.3: Lógica del módulo de ampacidad normativa. Elaboración propia.

En términos funcionales, el módulo realiza:

- Selección del conjunto de tablas base según normativa y nivel de tensión. En baja tensión se emplean tablas asociadas a IEC 60364-5-52 y/o normativa local; en media tensión, tablas compatibles con la construcción de cables de MT (por ejemplo, IEC 60502-2). En el marco norteamericano se utilizan tablas y correcciones asociadas a NEC/NFPA y guías de práctica.
- Aplicación de factores de corrección por temperatura del medio (aire o suelo), agrupamien-

to y condiciones particulares del método de instalación. El resultado es una ampacidad efectiva por alternativa de calibre.

- Búsqueda del primer calibre normalizado cuya ampacidad efectiva sea mayor o igual a la corriente del circuito.
- Escalamiento cuando no existe solución directa: si se agotan calibres disponibles para un número fijo de conductores en paralelo por fase, el módulo incrementa el número de conductores en paralelo por fase (NSC) y reinicia la búsqueda, dejando registro del valor adoptado.

La salida del criterio es un calibre recomendado por ampacidad, junto con variables de respaldo: ampacidad efectiva, factores aplicados, tipo de construcción (mono/multi cuando corresponda) y NSC.

4.2.3. Criterio de caída de tensión en régimen permanente

La verificación de caída de tensión en régimen permanente controla que la regulación del circuito se mantenga bajo el límite definido por el proyecto. La Figura 4.4 resume la lógica.

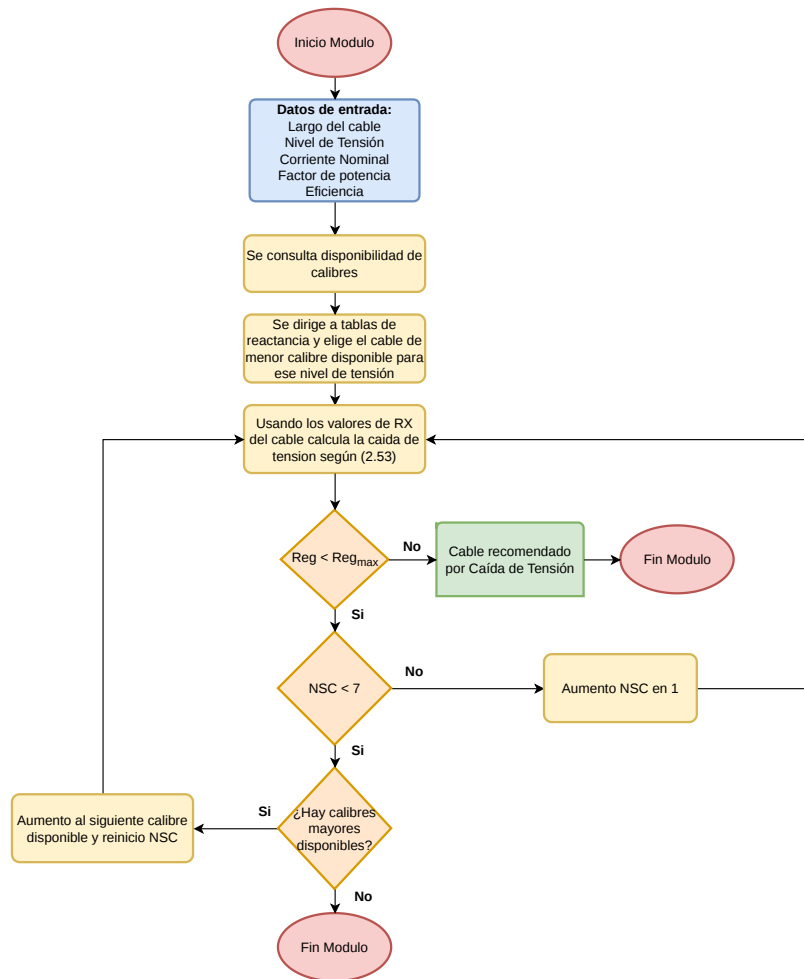


Figura 4.4: Lógica del módulo de caída de tensión en régimen permanente. Elaboración propia.

El cálculo se basa en la impedancia del circuito, seleccionando parámetros eléctricos (resistencia y reactancia) acordes al nivel de tensión y a la construcción (mono o multiconductor), de acuerdo con bases de datos de fabricantes compiladas en el Anexo C. A partir del calibre mínimo aplicable, se evalúa la regulación; si la caída excede el umbral, se incrementa el calibre normalizado y se repite el cálculo hasta cumplir el límite o agotar alternativas.

La salida de este criterio es el calibre recomendado por regulación en régimen permanente, junto con el valor de regulación obtenido para el calibre adoptado, lo que permite cuantificar el margen respecto del límite.

4.2.4. Criterio de caída de tensión en partida de motores

Cuando el circuito corresponde a un motor y la condición de partida es relevante para el proyecto, se habilita una verificación adicional de caída de tensión durante partida. La Figura 4.5 resume el procedimiento.

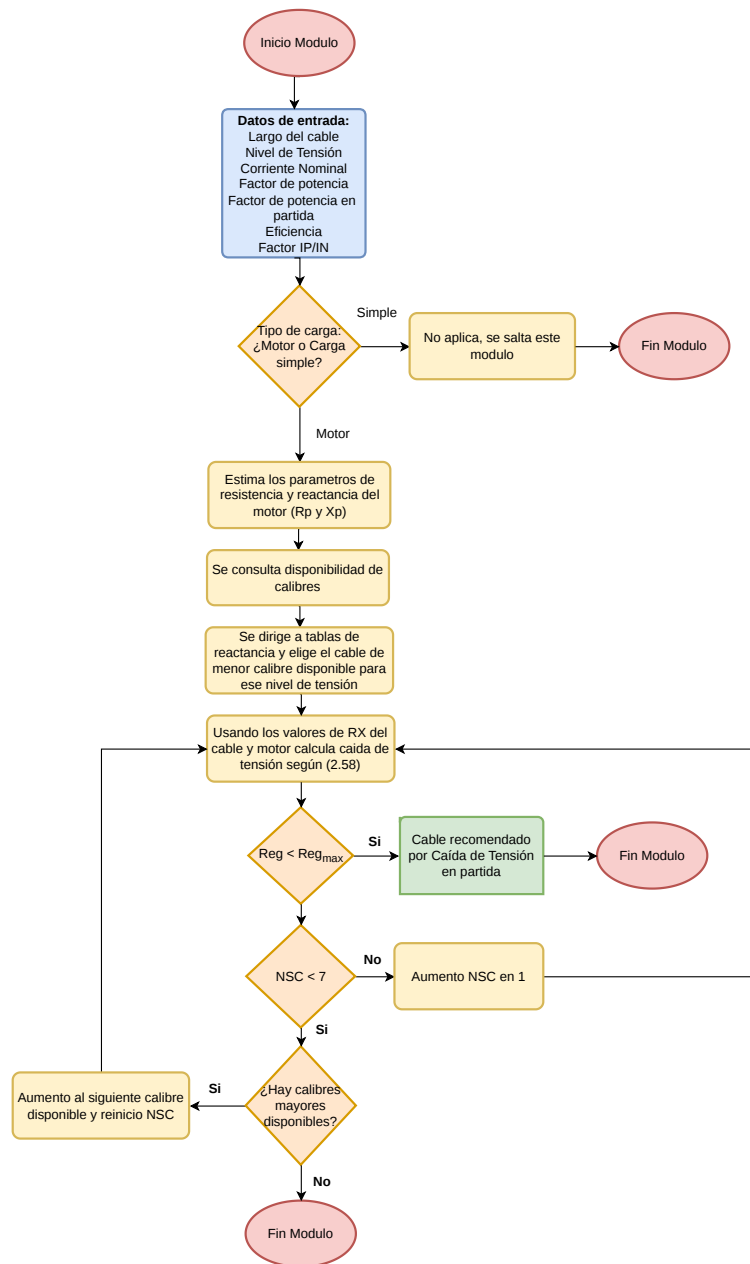


Figura 4.5: Lógica del módulo de caída de tensión en partida de motores. Elaboración propia.

En esta rutina se incorporan parámetros asociados al motor y a su régimen de partida (por ejemplo, relación de corriente de partida a nominal y factor de potencia en partida). Cuando la información no se encuentra disponible en la planilla, la plataforma puede completar parámetros representativos desde una base interna, de modo de mantener un criterio homogéneo de evaluación entre circuitos.

El procedimiento sigue la misma lógica que en régimen permanente: se parte desde un calibre

mínimo aplicable, se calcula la regulación en partida y se incrementa el calibre hasta cumplir el límite o agotar alternativas. La salida es un calibre recomendado por partida y el valor de regulación asociado.

4.2.5. Criterio térmico ante cortocircuito

La verificación de cortocircuito evalúa que el conductor soporte el esfuerzo térmico asociado a una corriente de falla durante el tiempo de despeje de la protección. La Figura 4.6 presenta la lógica.

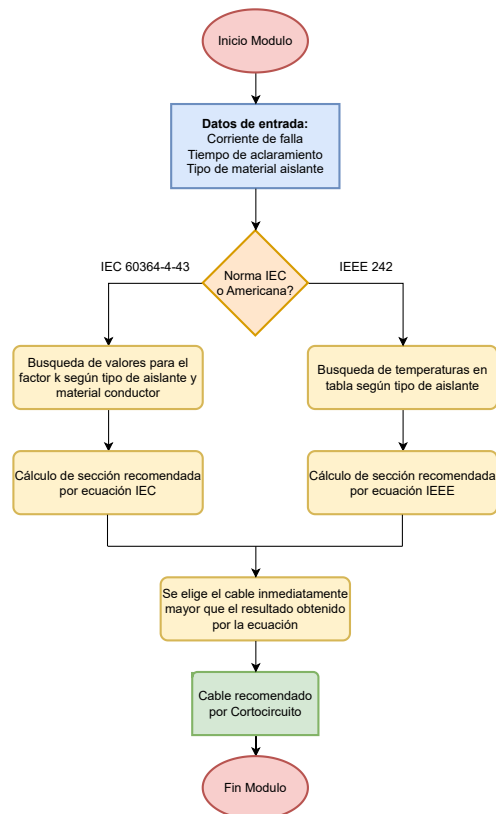


Figura 4.6: Lógica del módulo de cortocircuito térmico. Elaboración propia.

Funcionalmente, el módulo:

- Utiliza la corriente de cortocircuito y el tiempo de despeje ingresados para el circuito.
- Considera el tipo de conductor y la clase de aislación para seleccionar constantes térmicas y el factor k , de acuerdo con el enfoque normativo aplicado (por ejemplo, IEC 60364-4-43) o referencias de práctica (por ejemplo, IEEE 242).

- Calcula un área mínima equivalente y selecciona el calibre normalizado inmediatamente superior disponible.

La salida es un calibre recomendado por cortocircuito, junto con los parámetros usados en la evaluación (I_{cc} y t).

4.2.6. Consolidación técnica y reporte de conductores válidos

Con los resultados de cada criterio, CableFunc consolida la selección técnica adoptando un candidato inicial conservador, usualmente el mayor calibre recomendado entre ampacidad, caída de tensión y cortocircuito (incluyendo partida cuando aplica). A partir de ese candidato se verifica el cumplimiento conjunto, considerando interacciones prácticas como: cambios de tipo de construcción (mono/multi), restricciones por disponibilidad comercial y ajustes asociados al uso de conductores en paralelo.

Si el candidato no satisface simultáneamente las restricciones activas, se escala al siguiente calibre normalizado disponible (y/o se ajusta NSC cuando corresponda), hasta encontrar una solución admisible o identificar que el caso requiere revisión.

La salida se expresa como un reporte de conductores válidos por circuito, el cual incluye:

- calibre técnico final recomendado (y NSC cuando aplica),
- tipo de construcción adoptada (mono/multi),
- ampacidad efectiva y factores aplicados,
- regulaciones de tensión en régimen permanente (y en partida si aplica),
- resultado de la verificación de cortocircuito asociado al calibre seleccionado.

De este modo, la salida conserva los valores que permiten identificar el criterio dominante y cuantificar márgenes frente a los límites de diseño.

La salida de CableFunc se reporta en una planilla con columnas fijas, alineadas con la plantilla corporativa, de modo que cada circuito conserve trazabilidad por criterio y se facilite la revisión. La información de salida se resume en la Tabla 4.2 y la planilla modelo se incluye en el Anexo E.2.

Output	Descripción
I_n	Corriente de diseño de la carga en A.
Factores de derrateo	FC : factor de corrección por temperatura (adimensional), asociado a la temperatura del medio en °C.
	FT : factor de corrección por agrupamiento y/o condiciones del método de instalación (adimensional).
Selección por criterio X (X : ampacidad, caída de tensión o cortocircuito).	Ampacidad admisible del cable en A.
	NSC: número de conductores en paralelo por fase.
	TIPO: construcción adoptada (mono o multi).
	Calibre: sección en mm ² (IEC/RIC) o designación AWG/kcmil (NEC).
Cable seleccionado	NSC: número de conductores en paralelo por fase.
	TIPO: construcción adoptada (mono o multi).
	Calibre: sección en mm ² (IEC/RIC) o designación AWG/kcmil (NEC).
	Ampacidad admisible del cable en A.
	Regulación en régimen permanente en %.
	Regulación en partida de motor en % (si aplica).

Tabla 4.2: Información de salida para CableFunc.

4.3. Optimización económica por pérdidas (EconFunc)

Una vez definida una solución técnicamente válida, la herramienta puede activar EconFunc para evaluar si conviene aumentar sección por reducción de pérdidas en el horizonte de evaluación. El objetivo no es optimizar de manera global sobre todos los calibres posibles, sino entregar una comparación acotada y trazable entre alternativas cercanas, consistente con decisiones habituales de ingeniería (por ejemplo, mantener el calibre técnico mínimo o incrementarlo uno o dos pasos cuando exista justificación económica). La lógica general se resume en la Figura 4.7 y las entradas en la Tabla 4.3.

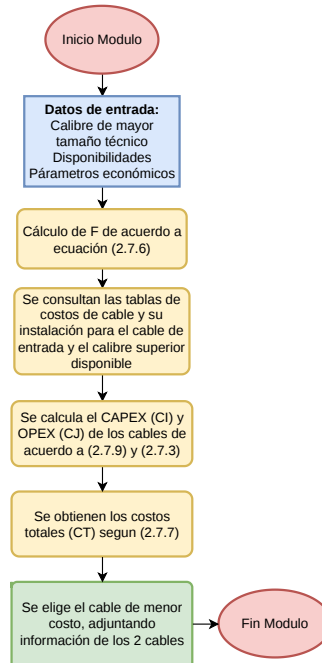


Figura 4.7: Lógica del módulo de optimización económica por pérdidas. Elaboración propia.

Input	Descripción
Años	Horizonte de evaluación del proyecto en Años.
Tasa de descuento	Tasa anual considerada para la estimación de valor presente en %.
Costo unitario de energía	Costo de energía utilizado en la evaluación en USD/MWh.
Curva de carga / factor de pérdidas	Parámetro equivalente para representar variación de carga (por ejemplo, factor de pérdidas μ o T equivalente).
Calibres y precios	Tabla con calibres normalizados disponibles y su costo unitario en USD/m.

Tabla 4.3: Parámetros de entrada para EconFunc. Si no se especifican, se utilizan valores de referencia configurados en la herramienta.

El módulo toma como punto de partida el calibre técnico final (típicamente el impuesto por el criterio más exigente) y construye un conjunto reducido de alternativas para comparación. En particular, se evalúa el calibre base y un conjunto acotado de calibres superiores (por ejemplo, uno o dos incrementos), manteniendo constante la configuración eléctrica ya definida por CableFunc (por ejemplo, NSC y el tipo mono/multi), salvo que la disponibilidad o la normalización obliguen a ajustar la alternativa evaluada.

La comparación combina:

- un componente de inversión asociado al cable e instalación (CAPEX), obtenido desde costos unitarios y longitud del circuito,
- un componente por costo de pérdidas Joule (OPEX), estimado a partir de la corriente representativa, la resistencia del conductor y un equivalente anual de utilización,
- el costo total equivalente en el horizonte económico definido (por ejemplo, valor presente), para seleccionar la alternativa de menor costo.

Los parámetros económicos pueden ser definidos por el usuario (vida útil, tasa de descuento, costo de energía y supuestos de utilización), o bien tomarse desde valores estándar para análisis preliminares. El marco conceptual sigue el enfoque de IEC 60287-3-2, integrando explícitamente el costo de pérdidas al proceso de selección cuando el circuito y el contexto del proyecto lo justifican. De este modo, EconFunc entrega una recomendación técnico–económica que puede coincidir con el calibre técnico mínimo o justificar un aumento de sección.

La salida final del módulo (Tabla 4.4) reporta la decisión de comparación y el resumen de costos que la sustenta, permitiendo revisar de manera directa la diferencia entre inversión y operación para las alternativas evaluadas.

Output	Descripción
Cable recomendado (técnico–económico)	NSC: número de conductores en paralelo por fase.
	TIPO: construcción adoptada (mono/multi).
	Calibre final normalizado (mm ² o AWG/kcmil).
	Ampacidad admisible del cable en A.
	Regulación en régimen permanente en %.
	Regulación en partida en % (si aplica).
¿Subir el calibre?	Indica SI/NO según la alternativa de menor costo total equivalente en el horizonte evaluado.
Resumen CAPEX/OPEX (alternativas evaluadas)	Costo de inversión (CAPEX) para calibre técnico en USD.
	Costo equivalente de pérdidas (OPEX) para calibre técnico en USD.
	Costo total equivalente para calibre técnico en USD.
	Costo de inversión (CAPEX) para alternativa superior en USD.
	Costo equivalente de pérdidas (OPEX) para alternativa superior en USD.
	Costo total equivalente para alternativa superior en USD.

Tabla 4.4: Variables reportadas por EconFunc en la salida económica.

4.4. Estudio térmico por elementos finitos (DuctBankFunc)

Esta sección describe la rama de análisis térmico detallado implementada para bancos de ductos, orientada a configuraciones donde el intercambio térmico no queda bien representado únicamente mediante tablas y factores de corrección. El propósito es resolver, sobre una sección transversal 2D, el campo de temperaturas del sistema cable–ducto–relleno–suelo y, a partir de ello, obtener resultados de interés para ingeniería: (i) corriente admisible asociada a un límite térmico del conductor, (ii) temperatura máxima del conductor para una corriente definida y (iii) curvas corriente–temperatura (I–T) que permiten comparar configuraciones.

El análisis se ejecuta en FEMM (modo *Heat Flow*) y se automatiza desde Python mediante PyFEMM, de modo que la geometría, materiales, condiciones de borde y extracción de resultados queden parametrizadas. Esto permite reproducibilidad (mismo conjunto de supuestos $\Rightarrow$ mismo resultado) y habilita análisis comparativos cambiando variables controladas (separación,

enterramiento, propiedades del relleno y del suelo). La lógica general se resume en la Figura 4.8.

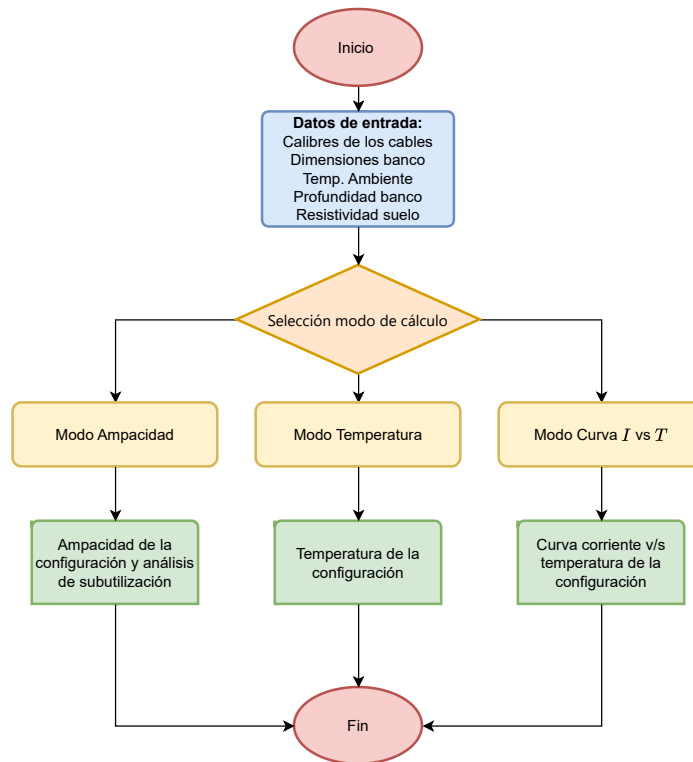


Figura 4.8: Flujo general de la rama térmica: definición del caso, selección de modo y reportes de salida. Elaboración propia.

Para mantener trazabilidad, los parámetros de simulación se organizan en entradas geométricas, térmicas y eléctricas que describen el banco de ductos y los cables. La Tabla 4.5 resume estas entradas, diseñadas para que el usuario pueda reconstruir el caso y comprender qué variables fueron determinantes en el resultado.

Input	Descripción
Arreglo del banco ($N \times M$)	Número de ductos por filas/columnas y su disposición geométrica.
Geometría de ductos y separación	Diámetros interno/externo del ducto y separación centro–centro entre ductos en mm.
Profundidad y dominio externo	Profundidad de enterramiento y dimensiones del dominio circundante para imponer condiciones de borde en mm.
Propiedades térmicas del medio	Resistividad térmica ρ_T del relleno y del suelo (según parametrización) en K m/W.
Características de los cables	Tipo de cable (mono/multiconductor), disposición (flat/trefoil) y calibre en mm ² .
Temperaturas de referencia	Temperatura del suelo/ambiente impuesta en fronteras en °C.
Corrientes de estudio	Dependen del modo: corriente incógnita (ampacidad), vector por ducto (temperatura) o rango inicio/fin/paso (I–T) en A.

Tabla 4.5: Entradas principales del análisis térmico para DuctBankFunc.

4.4.1. Modelo físico y supuestos de simulación

El problema resuelto corresponde a un modelo estacionario de transferencia de calor en 2D, representado por la ecuación de difusión con generación volumétrica en los conductores (Sección 2.2.5). En términos prácticos, las pérdidas por efecto Joule se incorporan como fuente volumétrica uniforme por conductor, consistente con el supuesto adoptado en el marco teórico (pérdidas dominantes en el metal conductor).

La conducción en sólidos (conductor, aislación, cubiertas, ducto, relleno y suelo) se modela mediante conductividad térmica por material. En el caso del aire confinado al interior de los ductos, el intercambio entre superficies no se representa como convección/radiación explícitas mediante una condición de borde, sino mediante una aproximación compatible con un modelo difusivo: el dominio de aire se asigna con una conductividad térmica efectiva k_{eff} calculada a partir de una temperatura de película y correlaciones de transferencia de calor para cavidades (por ejemplo, tipo Raithby–Hollands, ver Sección 2.4.2). Este enfoque permite incorporar, de forma compacta, el aumento de transferencia respecto a la conducción pura, manteniendo un solver térmico lineal por corrida.

El entorno lejano se representa imponiendo una condición de temperatura conocida en un contorno externo suficientemente alejado del banco. La elección de un dominio mayor al banco evita que la condición de borde impuesta distorsione el gradiente térmico de interés en la zona cercana a cables y ductos, y entrega una referencia coherente para comparar escenarios.

4.4.2. Secuencia común del análisis FEM automatizado

Independiente del modo de operación, la simulación sigue una secuencia base: (i) se construye la geometría del banco y del dominio externo, (ii) se asignan materiales y condiciones de borde, (iii) se definen fuentes volumétricas de calor en los conductores, (iv) se resuelve el modelo térmico, y (v) se extraen temperaturas de interés, en particular la temperatura máxima del conductor como variable crítica.

A nivel funcional, DuctBankFunc concentra este ciclo de preparación y resolución. Recibe la geometría ($N \times M$), condiciones del entorno y propiedades del medio, construye el modelo y, cuando corresponde, actualiza propiedades dependientes de temperatura (por ejemplo, resistencia eléctrica y/o k_{eff} del aire). La lógica se resume en la Figura 4.9.

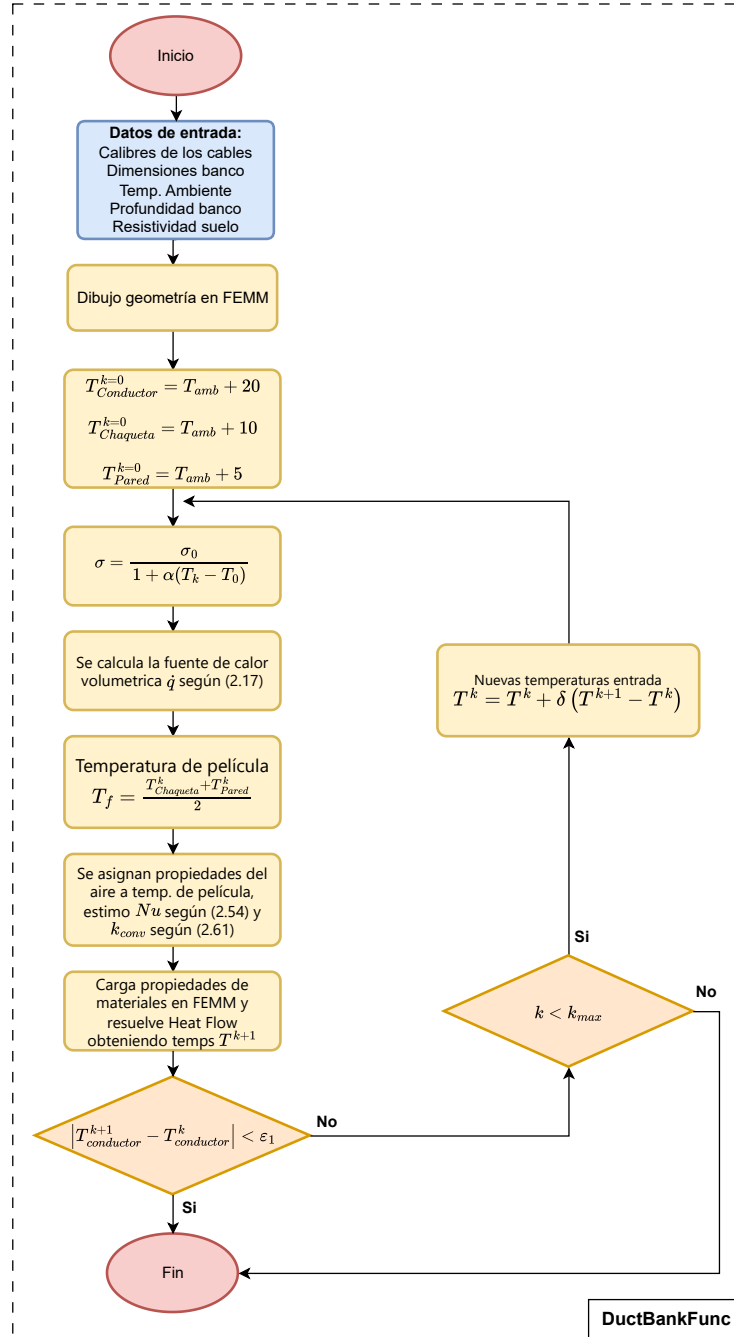


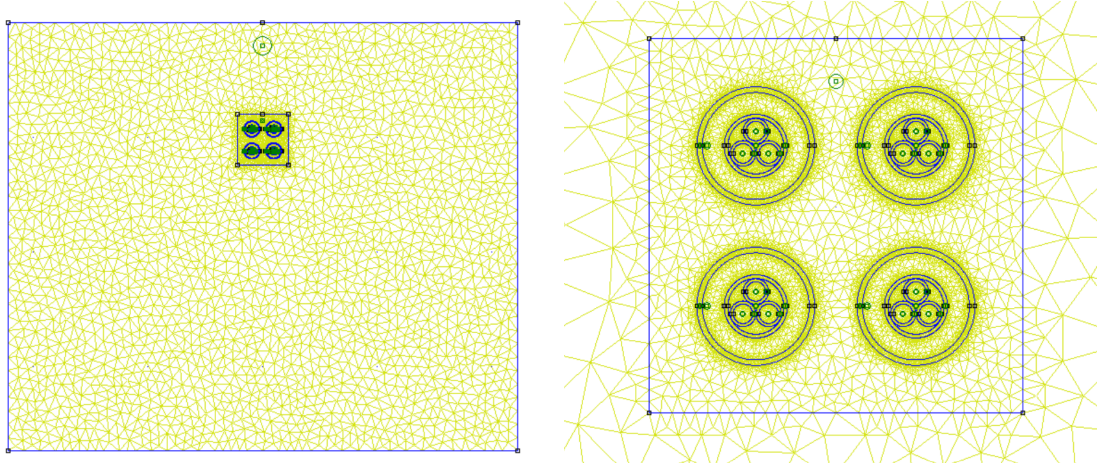
Figura 4.9: Bloque funcional DuctBankFunc: construcción del caso, actualización de propiedades dependientes de temperatura, resolución y postproceso. Elaboración propia.

4.4.2.a. Geometría 2D y discretización (malla)

La simulación se resuelve sobre una sección transversal 2D que incluye el banco de ductos y un dominio de suelo circundante. Para capturar gradientes térmicos relevantes sin aumentar innecesariamente el tiempo de cálculo, se utiliza una malla triangular no uniforme: el mallado

se densifica en la zona de interés (cables, aire interior, paredes de ductos y relleno inmediato) y se hace progresivamente más grueso hacia regiones alejadas, donde el gradiente es menor.

La Figura 4.10 muestra un ejemplo: (a) dominio global con el contorno externo y (b) detalle del banco con refinamiento alrededor de cables y ductos. Esta estrategia es coherente con la naturaleza del problema, donde los máximos gradientes se ubican típicamente en interfaces de materiales (conductor–aislación, aislación–aire, aire–ducto y ducto–relleno).



(a) Dominio global del modelo con el contorno externo.

(b) Detalle del banco: malla más densa en torno a cables y ductos.

Figura 4.10: Ejemplo de malla triangular utilizada en FEMM para el análisis térmico de un banco de ductos. Elaboración propia.

4.4.3. Iteración termo–eléctrica y estabilización numérica

En bancos de ductos, la potencia disipada por efecto Joule depende de la resistencia eléctrica del conductor y, por tanto, de su temperatura. Además, el intercambio térmico en el interior del ducto puede representarse mediante una conductividad efectiva del aire que también depende de una temperatura representativa del fluido. Por ello, el cálculo se resuelve mediante un ciclo iterativo que busca consistencia entre pérdidas eléctricas y campo térmico.

En términos operativos, el ciclo considera:

- adopción de una estimación inicial de temperatura del conductor y del aire (por ejemplo, a partir de la temperatura del suelo y un incremento preliminar),
- actualización de la resistencia eléctrica del conductor en función de temperatura (y, cuando aplica, actualización de k_{eff} del aire mediante correlaciones basadas en Ra y Pr evaluadas a temperatura de película),
- ejecución del solver térmico y obtención de una nueva estimación de temperatura máxima del conductor,

- verificación de convergencia: si el cambio entre iteraciones es menor que una tolerancia definida, se detiene; en caso contrario, se repite.

Para reducir oscilaciones numéricas en escenarios exigentes (por ejemplo, geometrías con fuerte acoplamiento o alta sensibilidad a k_{eff}), se utiliza relajación numérica con un factor δ :

$$T_{\text{rel}}^{(n+1)} = \delta T^{(n+1)} + (1 - \delta) T^{(n)}, \quad (4.1)$$

donde $T^{(n)}$ es la estimación en la iteración n y $T^{(n+1)}$ el valor obtenido tras resolver FEMM. Este esquema suaviza el avance de la iteración y mejora estabilidad cuando la actualización de propiedades genera variaciones abruptas.

4.4.4. Modos de operación

La rama térmica se organiza en tres modos. En todos los casos se reutiliza el mismo bloque `DuctBankFunc`; lo que cambia es cómo se define la corriente de entrada y qué salida se registra.

4.4.4.a. Modo ampacidad

En modo ampacidad se busca la corriente que hace que la temperatura máxima del conductor alcance un límite objetivo T_{lim} (por ejemplo, 90°C). Para ello se define una función objetivo:

$$g(I) = T_{\text{máx}}(I) - T_{\text{lim}}, \quad (4.2)$$

donde $T_{\text{máx}}(I)$ es la temperatura máxima del conductor obtenida desde FEMM al imponer la corriente I , incorporando la iteración termo-eléctrica descrita previamente. El problema se reduce a encontrar la raíz de $g(I)$.

En la implementación, la raíz se obtiene con `root_scalar` de SciPy utilizando el método `brentq`, el cual requiere un intervalo $[I_{\text{mín}}, I_{\text{máx}}]$ donde exista cambio de signo ($g(I_{\text{mín}}) g(I_{\text{máx}}) < 0$). Si el intervalo inicial no encierra la raíz, el procedimiento expande $I_{\text{máx}}$ de manera controlada hasta lograr cambio de signo o hasta alcanzar un límite definido por criterios de seguridad del estudio. El resultado es la corriente admisible I_{adm} en A para el caso geométrico y térmico analizado. La Figura 4.11 resume esta lógica.

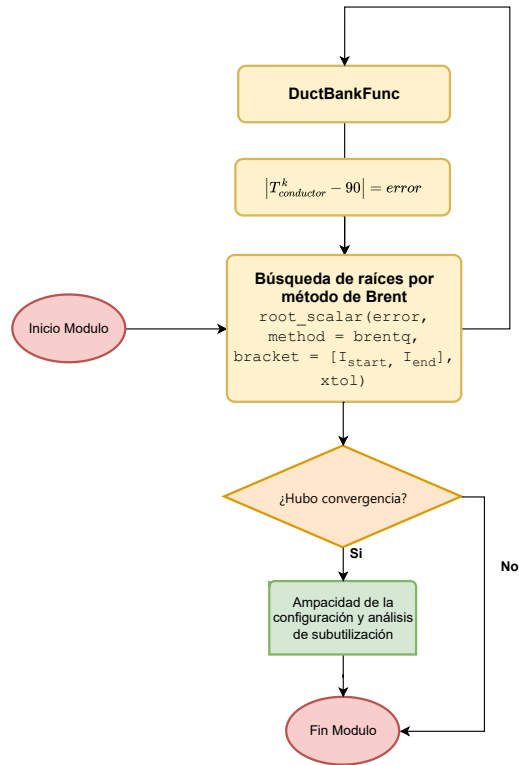


Figura 4.11: Modo ampacidad: búsqueda de la corriente que satisface el límite térmico del conductor. Elaboración propia.

4.4.4.b. Modo temperatura

En modo temperatura, el usuario fija un vector de corrientes (por ducto) y el sistema calcula el campo térmico resultante. Este modo permite evaluar escenarios no uniformes, como desbalances de carga o corrientes distintas por ducto, reportando temperaturas máximas del conductor y valores relevantes por ducto/cable según la configuración. La Figura 4.12 resume la lógica.

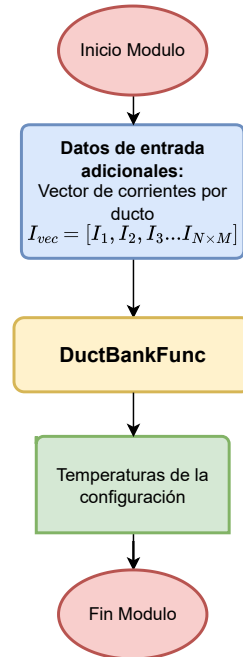


Figura 4.12: Modo temperatura: cálculo del campo térmico para corrientes definidas por el usuario. Elaboración propia.

4.4.4.c. Modo curva corriente–temperatura (I–T)

En modo curva I–T se define un rango de corrientes y un número de pasos. Para cada punto, el sistema ejecuta una simulación completa (incluida la iteración termo–eléctrica) y registra la temperatura máxima correspondiente, construyendo una tabla corriente–temperatura. Esta salida es útil para comparar configuraciones (por ejemplo, geometrías $N \times M$, separación entre ductos, enterramiento o propiedades térmicas del relleno), y para identificar de manera directa el umbral de corriente asociado a un límite térmico. La Figura 4.13 resume el procedimiento.

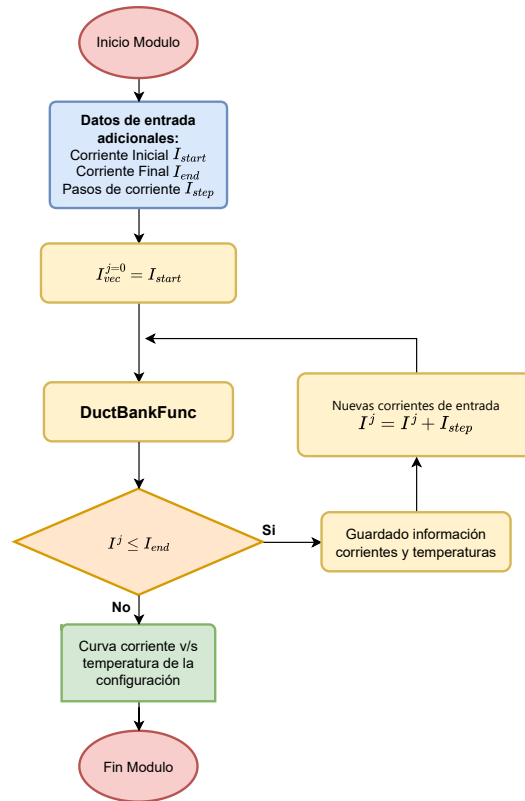


Figura 4.13: Modo curva I-T: barrido de corrientes y registro de la temperatura máxima del conductor por punto. Elaboración propia.

4.4.5. Salidas del análisis térmico

Según el modo de operación, la rama térmica entrega: (a) un reporte de ampacidad, (b) un reporte de temperaturas máximas y valores relevantes en la sección, y (c) una tabla de curva I-T. En la herramienta, estos resultados se presentan tanto en planilla como en la interfaz, de modo que el usuario pueda revisar rápidamente qué ducto/cable resulta más exigente y cuál es el margen respecto del límite térmico. La Tabla 4.6 resume las salidas reportadas.

Funcionalidad	Descripción de las salidas
Cálculo de ampacidad	Ampacidad del banco de ductos en A (corriente que satisface $T_{\text{máx}} = T_{\text{lim}}$).
	Temperaturas características por ducto/cable (conductor, chaqueta, aire y pared) en °C.
	Indicador de ducto/cable limitante, útil para identificar posiciones críticas (interiores/perimetrales).
Cálculo de temperaturas	Temperaturas características por ducto/cable (conductor, chaqueta, aire y pared) en °C.
Curva I–T	Tabla corriente–temperatura en A-°C para el conductor más caliente (por ducto o global), incluyendo referencia al límite de operación.

Tabla 4.6: Salidas principales del análisis térmico para bancos de ductos.

Capítulo 5

Implementación de la herramienta y validación de resultados

Este capítulo presenta una verificación acotada del funcionamiento de la plataforma implementada, enfocada en dos componentes: (i) la selección técnico–económica de conductores (CableFunc y EconFunc) y (ii) el análisis térmico por elementos finitos en bancos de ductos (DuctBankFunc). La verificación se orienta a comprobar consistencia de resultados frente a referencias externas y, en paralelo, a mostrar el aporte operativo de la herramienta en términos de trazabilidad y reducción de tiempo de análisis para un conjunto de circuitos.

5.1. Alcance y criterios de comparación

La validación se plantea sobre un conjunto reducido de casos, seleccionados para representar el uso típico en ingeniería de proyectos. Se consideran los siguientes frentes:

- **CableFunc**: se contrasta el resultado de la herramienta con resultados obtenidos previamente en proyectos utilizando la plantilla corporativa, verificando coincidencia de calibre y NSC (cuando aplica), junto con los márgenes de cumplimiento por criterio (ampacidad, regulación en régimen permanente y verificación térmica ante cortocircuito). Adicionalmente, se reporta el tiempo total de ejecución para el lote y el tiempo promedio por circuito.
- **EconFunc**: a partir del calibre técnico definido por CableFunc, se evalúa la recomendación económica bajo parámetros de referencia utilizados en documentación interna (horizonte, tasa de descuento, precio de energía y costos unitarios de cable/instalación). Se reporta la comparación de costos de inversión y de pérdidas para el calibre técnico y para alternativas superiores cercanas, junto con la cantidad de casos en que se recomienda aumentar sección y el beneficio económico asociado.
- **DuctBankFunc**: se comparan ampacidad y/o temperaturas máximas contra una referencia externa de cálculo. Para ello se utiliza (a) una referencia tabulada/normativa aplicable al caso de instalación y (b) una simulación en ETAP (módulo *Cable Thermal Analysis – Underground Raceway Systems*). Se complementa con una sensibilidad breve sobre parámetros térmicos dominantes (por ejemplo, resistividad térmica del medio y geometría del banco), con el fin de identificar tendencias y coherencia física.

Como métricas de comparación se utilizan:

- coincidencia del calibre recomendado y del número de conductores por fase (NSC) cuando corresponda,
- diferencias relativas en magnitudes de respaldo (por ejemplo, ampacidad efectiva y regulación de tensión),
- tiempo total de ejecución y tiempo promedio por circuito en CableFunc,
- diferencia relativa en ampacidad y/o en $T_{\text{máx}}$ en DuctBankFunc.

En los casos donde existan discrepancias entre referencias, el análisis se centra en identificar su origen (hipótesis de instalación, parámetros térmicos asumidos, criterios de corrección aplicados o diferencias de modelación), priorizando consistencia y trazabilidad por sobre coincidencia numérica exacta.

5.2. Validación de CableFunc y EconFunc (vs. planilla corporativa)

5.2.1. Caso de prueba y datos de entrada

El caso de prueba se construye a partir de una planilla corporativa con circuitos representativos de ingeniería de detalle (cargas generales y motrices), manteniendo la misma estructura de columnas de entrada y los supuestos globales del proyecto. La Tabla 5.1 resume los parámetros transversales del proyecto configurados para la corrida de comparación.

Parámetro	Valor	Comentario
Normativa	IEC	IEC/RIC o NEC según corresponda
Frecuencia	50	Hz
Límite de regulación permanente	3	%
Límite de regulación en partida	10	% (solo motores)
Temperatura ambiente/suelo	40/20	°C

Tabla 5.1: Supuestos globales utilizados en el caso de comparación de CableFunc.

5.2.2. Comparación de resultados

La comparación se realizó circuito a circuito entre: (a) el resultado obtenido con la planilla corporativa y (b) la salida reportada por CableFunc, utilizando un total de $N = 291$ circuitos. Se evaluó la coincidencia del calibre final y, cuando aplica, el número de conductores en paralelo por fase (NSC). Dado que la selección se efectúa sobre un conjunto discreto de secciones normalizadas, la concordancia también se analizó en términos de pasos normalizados, para cuantificar cercanía aun cuando no exista igualdad exacta.

En esta planilla, los calibres se expresan en mm^2 . Para el análisis por pasos, se ordenó el conjunto de secciones normalizadas presentes en el lote (por ejemplo: 1.5, 2.5, 4, 6, 10, $\dots$, 300 mm^2) y se definió el desfase como la diferencia de índices entre el calibre reportado por CableFunc y el de la planilla corporativa. La Tabla 5.2 resume las métricas principales obtenidas, que sirven de base para las visualizaciones posteriores.

Métrica	Resultado
Número de circuitos comparados	291
Coincidencia exacta de calibre (mm^2)	33.7%
Coincidencia de calibre en ± 1 paso normalizado	98.6%
CableFunc selecciona 1 paso superior	60.5%
CableFunc selecciona 1 paso inferior	4.5%
Coincidencia de NSC	98.3%
$ \Delta \text{REG. PERM} $ promedio	0.20 (p.p.)

Tabla 5.2: Resumen cuantitativo de la comparación entre CableFunc y la planilla corporativa (lote de 291 circuitos). La diferencia de regulación permanente se reporta en puntos porcentuales.

La Figura 5.1 muestra la comparación directa de calibres finales en escala logarítmica. La concentración de puntos en torno a la diagonal $y = x$ es consistente con la coincidencia de 98.6% dentro de ± 1 paso normalizado, indicando que, para la gran mayoría del lote, ambas metodologías convergen a secciones iguales o adyacentes en la serie normalizada.

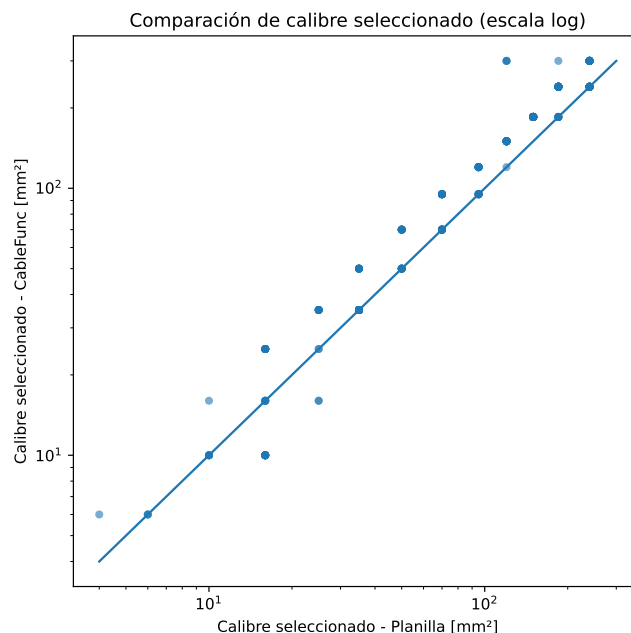


Figura 5.1: Comparación de calibre final seleccionado (mm^2): planilla corporativa vs. CableFunc. Se utiliza escala logarítmica por el rango amplio de secciones normalizadas.

Para describir la direccionalidad del desfase, la Figura 5.2 clasifica los circuitos según si CableFunc coincide, selecciona un calibre superior o inferior respecto de la planilla corporativa. En este lote, el comportamiento observado se resume en que un 60.5% de los casos queda un paso por encima, mientras que un 4.5% queda un paso por debajo, manteniéndose mayoritariamente dentro de la grilla normalizada inmediata.

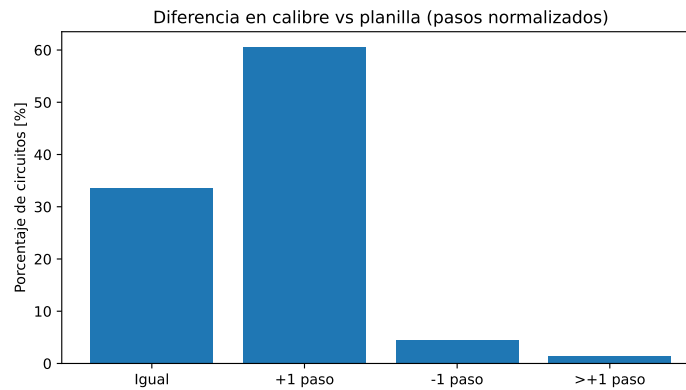


Figura 5.2: Clasificación de la selección de calibre: coincidencia exacta, calibre superior e inferior respecto de la planilla corporativa.

Como contraste eléctrico de respaldo, se comparó la regulación permanente reportada por ambas salidas. La Figura 5.3 presenta la distribución de la diferencia $\Delta\text{REG. PERM}$ (en puntos porcentuales), donde se observa una dispersión acotada: en 93.1% de los circuitos la diferencia absoluta es menor o igual a 0.5 puntos. Este resultado respalda consistencia a nivel de desempeño del circuito, incluso cuando el calibre final no coincide exactamente.

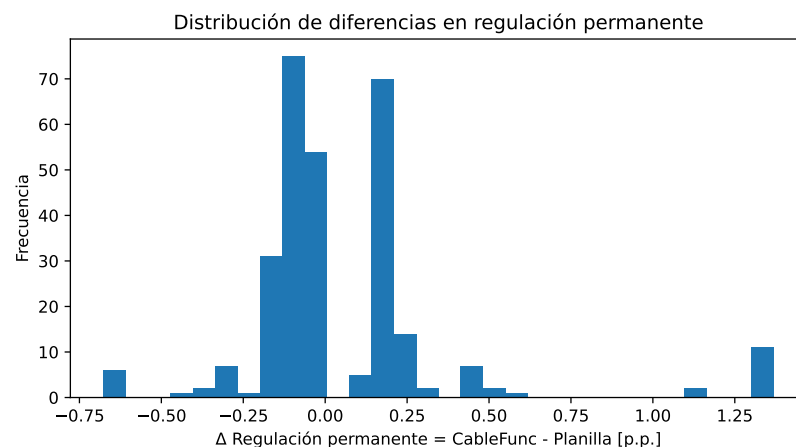


Figura 5.3: Distribución de la diferencia en regulación permanente entre CableFunc y la planilla corporativa (puntos porcentuales).

En conjunto, el lote muestra una equivalencia operacional entre CableFunc y la planilla corporativa en el sentido de que la selección final se mantiene casi siempre en el mismo calibre o en

el adyacente de la serie normalizada, con diferencias pequeñas en variables de respaldo como regulación. Las discrepancias de un paso son coherentes con decisiones discretas propias del dimensionamiento (elección mono/multi, disponibilidad de secciones, y escalamiento por paralelos) y con diferencias de redondeo/criterios de selección al operar sobre grillas normalizadas.

5.2.3. Validación de EconFunc (CAPEX vs. OPEX por pérdidas)

La validación de EconFunc verifica consistencia en la decisión al contrastar: (i) el costo de inversión asociado al conductor recomendado técnicamente y (ii) el costo equivalente de pérdidas por efecto Joule en un horizonte de evaluación. El análisis se aplica sobre el mismo lote de circuitos de la validación de CableFunc, usando como punto de partida el conductor técnico ya definido.

Para cada circuito se comparan dos alternativas:

- Alternativa técnica (TEC): conductor técnico recomendado por CableFunc.
- Alternativa económica (ECO): conductor inmediatamente superior al técnico (manteniendo el resto de supuestos del circuito), evaluado para decidir si el incremento de sección se justifica económicamente.

Para cada alternativa, el módulo calcula costo de instalación (CI), costo equivalente de pérdidas (CJ) y costo total equivalente ($CT = CI + CJ$). La decisión se resume mediante:

$$\Delta CT = CT_{\text{TEC}} - CT_{\text{ECO}}. \quad (5.1)$$

Si $\Delta CT > 0$, la alternativa ECO reduce el costo total equivalente y se recomienda aumentar el calibre.

5.2.3.a. Supuestos económicos

Los resultados se calcularon con los parámetros de la Tabla 5.3 y precios de conductores obtenidos de documentación de proyectos interna de Hatch, reportando montos en USD.

Parámetro	Valor	Comentario
Vida útil / horizonte de evaluación N	10	años
Tasa de descuento anual i	8	%
Precio de energía	104.3	USD/MWh
Moneda de reporte	USD	instalación, pérdidas y totales

Tabla 5.3: Supuestos económicos usados en la evaluación de EconFunc.

En términos de implementación, los precios de referencia se procesan en forma consistente con la moneda de reporte definida para el proyecto, de modo que CI , CJ y CT sean comparables en la misma base monetaria.

5.2.3.b. Métricas resumidas

Sobre el lote de $N = 291$ circuitos, EconFunc recomendó aumentar el calibre en 138 casos (47.4%). En dichos circuitos, el incremento de inversión se ve compensado por una reducción del costo equivalente de pérdidas, resultando una disminución del costo total equivalente. El resumen de resultados agregados se presenta en la Tabla 5.4.

Métrica (lote de validación)	Valor
Número de circuitos evaluados	291
Casos con recomendación de subir el calibre	138 (47.4%)
Beneficio total agregado	732 082 USD
Beneficio por circuito (casos recomendados) – promedio	5 305 USD

Tabla 5.4: Resumen de resultados de EconFunc en el lote de validación (valores en USD).

En síntesis, EconFunc opera como una etapa posterior a la selección técnica: identifica los casos en que la reducción del componente CJ compensa el aumento de CI bajo los supuestos del proyecto, y entrega una recomendación técnico–económica respaldada por costos comparativos consistentes con el marco de IEC 60287-3-2.

5.3. Validación de DuctBankFunc (vs. referencia y ETAP)

Esta sección presenta una validación acotada del módulo DuctBankFunc. El foco es doble: primero, verificar tendencias físicas esperables mediante sensibilidades simples (variando un parámetro a la vez); segundo, contrastar un caso base con una simulación en ETAP y con un valor de referencia calculado bajo el esquema tabulado tipo NEC/IEEE. El propósito no es forzar igualdad exacta entre herramientas —cada una incorpora supuestos internos distintos—, sino comprobar consistencia de orden de magnitud y coherencia del comportamiento ante parámetros geométricos y térmicos.

5.3.1. Caso base y configuración del modelo

Para el análisis en FEMM se definieron los parámetros geométricos, térmicos y eléctricos de las Tablas 5.5 y 5.6, representativos de un banco de ductos enterrado. En el modelo FEM se impone temperatura en el contorno externo del dominio y se resuelve el problema estacionario de conducción en 2D, incorporando iteración termo–eléctrica (resistencia del cobre dependiente de temperatura) y un tratamiento equivalente de intercambio en aire confinado mediante conductividad efectiva $k_{\text{aire,eff}}(T)$.

Parámetro	Valor	Comentario
Arreglo del banco ($N \times M$)	2×2	Caso base de validación
Diámetro interno del ducto	127 mm	PVC
Separación centro a centro	190.5 mm	Entre ductos
Profundidad de enterramiento	750 mm	Referencia desde superficie
Temperatura ambiente	35 °C	Condición de borde superior
Temperatura de suelo	20 °C	Referencia térmica
Resistividad térmica del suelo ρ_{th}	0.9 K m/W	Caso base
Límite térmico del conductor T_{lim}	90 °C	XLPE

Tabla 5.5: Parámetros principales utilizados en la validación de DuctBankFunc.

Material	Conductividad térmica [W/m K]
Conductor (Cu)	401
Aislación (XLPE)	0.28
Chaqueta (PVC)	0.19
Aire (base a 20 °C)	0.260
Ducto (PVC)	0.19
Relleno / hormigón	1.0
Suelo	1.5

Tabla 5.6: Conductividades térmicas consideradas. En el caso del aire confinado se utiliza $k_{aire,eff}(T)$ calculada mediante una correlación equivalente de convección natural.

5.3.2. Sensibilidades de parámetros dominantes

Para verificar coherencia física del modelo, se realizaron sensibilidades variando un parámetro a la vez y manteniendo constantes las demás condiciones del caso. En estas pruebas se utilizó un cable multiconductor de 300 mm² en un banco 2 × 2, con enterramiento de 750 mm, temperatura ambiente de 35 °C y temperatura de suelo de 20 °C.

5.3.2.a. Sensibilidad a separación entre ductos

Se varió la separación centro a centro entre ductos desde 190.5 mm hasta 800 mm, manteniendo un diámetro interno de los ductos de 127 mm y $\rho_{th} = 0.9$ K m/W. La Figura 5.4 muestra un aumento monótono de la ampacidad al incrementar la separación, consistente con una menor interacción térmica entre ductos contiguos.

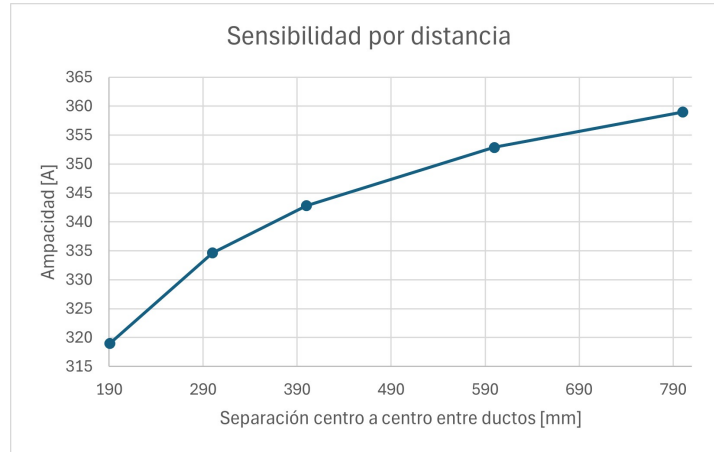


Figura 5.4: Sensibilidad de amplitud por separación centro a centro entre ductos (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm^2). Elaboración propia.

5.3.2.b. Sensibilidad a diámetro interno del ducto

Se varió el diámetro interno del ducto entre 127 mm y 300 mm, manteniendo la separación centro a centro en 300 mm y el resto de parámetros constantes. En la Figura 5.5 se aprecia una tendencia creciente de amplitud al aumentar el diámetro, atribuible a una cavidad con mayor espacio interno y, por ende, una condición más favorable para el intercambio térmico dentro del ducto bajo el modelo equivalente adoptado.

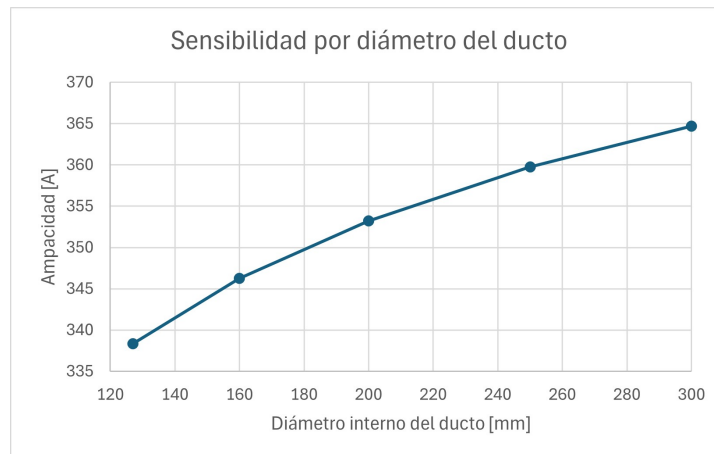


Figura 5.5: Sensibilidad de amplitud por diámetro interno del ducto (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm^2). Elaboración propia.

5.3.2.c. Sensibilidad a resistividad térmica del suelo

Se varió la resistividad térmica del suelo desde 0.9 K m/W hasta 2.5 K m/W , manteniendo separación centro a centro 190.5 mm y diámetro interno 127 mm . La Figura 5.6 muestra una reducción monótona de amplitud al aumentar ρ_{th} , consistente con un peor camino de

conducción hacia el entorno y una menor capacidad global de disipación.

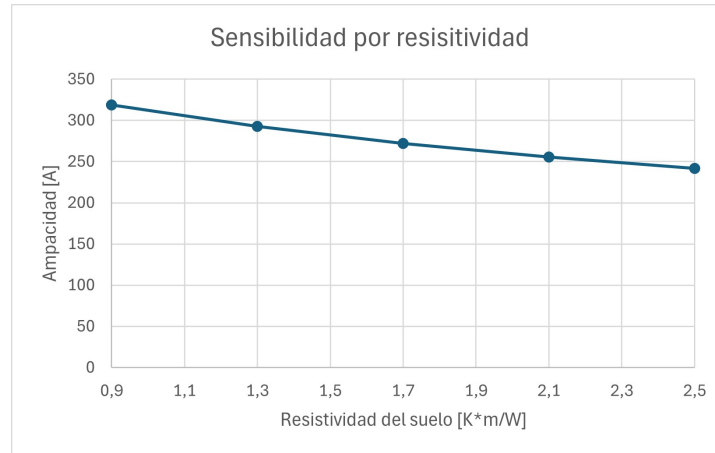


Figura 5.6: Sensibilidad de ampacidad por resistividad térmica del suelo (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm²). Elaboración propia.

5.3.2.d. Sensibilidad a temperatura ambiente

Finalmente, se evaluó la influencia de la temperatura ambiente exterior T_a sobre la ampacidad del banco, variando T_a entre 20 °C y 40 °C y manteniendo constantes el resto de las condiciones del caso base (banco 2×2 , ductos de 127 mm, separación centro a centro 190.5 mm, enterramiento 750 mm y $\rho_{th} = 0.9 \text{ K m/W}$). La Figura 5.7 muestra que la ampacidad disminuye de forma monótona al aumentar T_a , lo cual es consistente con el criterio físico: al elevarse la temperatura del entorno, se reduce el diferencial térmico disponible para disipar calor desde el conductor hacia el medio, por lo que se requiere una menor corriente para alcanzar el límite térmico T_{lim} del aislamiento.

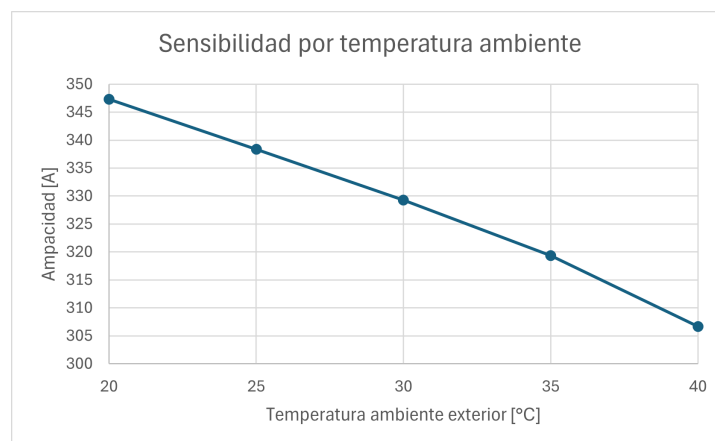


Figura 5.7: Sensibilidad de ampacidad por temperatura ambiente exterior (banco 2×2 , cable MULTI 300 mm²). Elaboración propia.

En términos cualitativos, la tendencia observada resulta esperable y relevante para condiciones

mineras: incrementos moderados de temperatura ambiente reducen la ampacidad admisible y, por ende, disminuyen el margen térmico del sistema. Este resultado refuerza que, en configuraciones subterráneas con acoplamiento térmico, el entorno térmico del proyecto (temperatura ambiente/suelo) es un parámetro dominante y debe definirse de manera consistente con las hipótesis del diseño.

5.3.2.e. Barrido corriente-temperatura

Como verificación adicional, se realizó un barrido de corriente desde 100 A hasta 400 A en pasos de 50 A para un banco 3×3 de multiconductores de 300 mm^2 presentado en la Figura 5.8, registrando la temperatura máxima del conductor por ducto y marcando el límite térmico de 90°C . La Figura 5.9 muestra el incremento no lineal de $T_{\text{máx}}$ con la corriente y permite identificar ductos críticos dentro del arreglo.

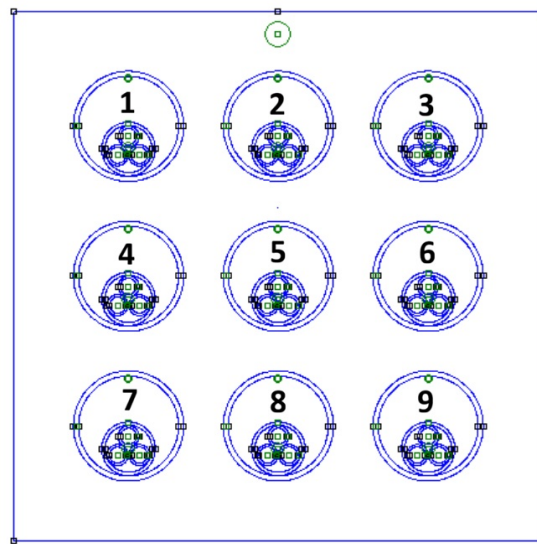


Figura 5.8: Configuración del banco 3×3 con su respectiva numeración de ductos utilizada en FEMM.

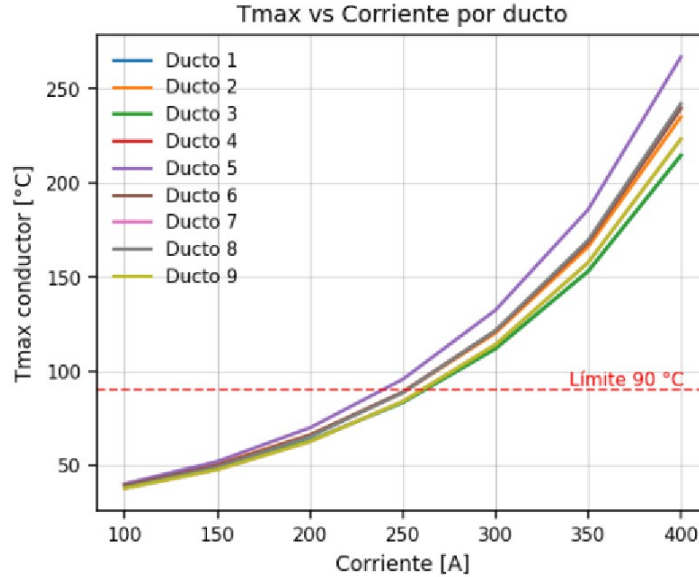


Figura 5.9: Barrido corriente–temperatura: $T_{\text{máx}}$ del conductor por ducto y referencia de límite térmico 90 °C (banco 3 × 3). Elaboración propia.

En este caso, el ducto central presenta una tendencia a alcanzar mayores temperaturas bajo corrientes uniformes, consistente con el calentamiento mutuo dentro del banco. Este comportamiento concuerda con la intuición física: las posiciones interiores disponen de menor “camino térmico libre” hacia el entorno y tienden a ser determinantes en la ampacidad global del arreglo. En conjunto, las sensibilidades confirman tendencias esperables: mayor separación y mayor diámetro interno tienden a elevar la ampacidad, mientras que un suelo más resistivo reduce la capacidad de disipación térmica y disminuye la ampacidad admisible.

5.3.3. Comparación contra ETAP y referencia tipo NEC/IEEE

Se comparó la ampacidad obtenida por DuctBankFunc (HARS) contra: (a) una simulación equivalente en ETAP usando el módulo *Cable Thermal Analysis – Underground Raceway Systems* y (b) un valor de referencia basado en ampacidad tabulada (NEC) ajustada para banco de ductos mediante factores tipo IEEE 399 para una configuración equivalente.

El caso corresponde a un banco 2 × 2 enterrado a 750 mm, ductos de 127 mm de diámetro interno, separación centro a centro 190.5 mm, $\rho_{th} = 0.9 \text{ K m/W}$ y temperatura ambiente 35 °C. El conductor modelado corresponde a tres monoconductores en disposición *flat*, sección 50 mm² (equivalente aproximado a AWG 1/0 para efectos de tablas norteamericanas).

Los resultados se muestran en la Tabla 5.7. La diferencia relativa se calcula respecto de HARS como $(\text{Amp}_{\text{fuente}} - \text{Amp}_{\text{HARS}}) / \text{Amp}_{\text{HARS}}$.

Fuente	Ampacidad [A]	Diferencia vs. HARS [%]
ETAP	138.43	0.97
IEEE/NEC (tablas)	137.1045	0.0032
HARS (DuctBankFunc)	137.1	–

Tabla 5.7: Comparación de ampacidad para banco de ductos 2×2 (3 monoconductores en *flat*, 50 mm^2).

Se observa una concordancia estrecha: la diferencia relativa entre HARS y el valor tabulado tipo IEEE/NEC es despreciable (menor a 0.01%), mientras que ETAP entrega un valor levemente superior (aprox. 1%). Bajo condiciones equivalentes, esta comparación respalda que el modelo implementado reproduce el orden de magnitud esperado y entrega resultados consistentes con una herramienta comercial y con referencias normativas, dentro de las variaciones asociadas a supuestos internos (definición del dominio externo, tratamiento convectivo equivalente, discretización y criterios de convergencia).

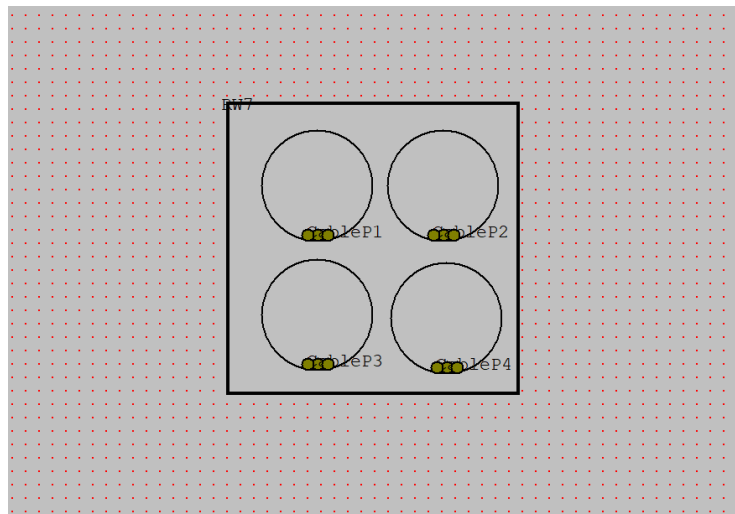


Figura 5.10: Configuración del banco de ductos utilizada en ETAP para la comparación de ampacidad. Fuente: elaboración propia en ETAP.

Así podemos establecer que la fortaleza de la herramienta está en poder asegurar resultados razonables y exactos para condiciones que se escapan de lo tradicional señalado en las tablas, ofreciendo versatilidad con sus distintos modos de cálculo según las necesidades del proyecto/instalación.

Capítulo 6

Conclusiones y futuros alcances

6.1. Discusión y cierre de validación

En esta memoria se desarrolló e implementó una herramienta computacional para apoyar la selección de conductores en proyectos industriales–mineros de Hatch Chile. La solución integra verificaciones técnicas (ampacidad, caída de tensión en régimen permanente y en partida, y cortocircuito térmico), una evaluación económica por pérdidas y, cuando se requiere mayor fidelidad térmica, un análisis bidimensional por elementos finitos para bancos de ductos. El objetivo central fue reducir la dependencia de macros desactualizados, explicitar supuestos y mejorar la trazabilidad del resultado por circuito.

La verificación del módulo CableFunc frente a una planilla corporativa mostró consistencia a nivel de decisión discreta. La coincidencia exacta del calibre no se presenta en todos los casos, lo que es esperable al trabajar con series normalizadas y reglas internas (disponibilidad, selección mono/multi y ajustes por paralelos). Aun así, la selección se mantiene mayoritariamente en el mismo calibre o en el calibre adyacente, y las variables de respaldo (por ejemplo, regulación en régimen permanente) presentan diferencias pequeñas. En términos prácticos, esto respalda que el módulo reproduce el criterio de selección con un comportamiento comparable al de la referencia interna, y facilita la revisión al reportar márgenes y resultados intermedios por criterio.

Respecto de la evaluación económica, EconFunc opera como una etapa posterior al cumplimiento técnico. En cada circuito contrasta el conductor técnico con una alternativa superior disponible y recomienda el aumento de sección solo cuando la reducción del costo equivalente de pérdidas compensa el incremento de inversión. En el lote evaluado, se observa que una fracción importante de circuitos presenta conveniencia de aumento de calibre bajo los supuestos económicos definidos, lo que confirma la utilidad del módulo para decisiones de eficiencia energética en horizontes de operación conocidos.

Finalmente, DuctBankFunc se verificó mediante sensibilidades simples y una comparación puntual con ETAP y una referencia tipo NEC/IEEE. Las sensibilidades muestran tendencias físicas coherentes (separación, diámetro, resistividad térmica y temperatura ambiente), y el caso comparativo entrega resultados de orden de magnitud muy cercano entre herramientas. Esto respalda el uso del modelo FEM 2D como complemento cuando el método tabulado no representa adecuadamente el acoplamiento térmico en bancos de ductos.

6.2. Aportes principales

Los aportes del trabajo pueden resumirse en:

- Implementación de una herramienta integrada para selección técnica y evaluación económica de conductores, con resultados trazables por circuito.
- Compatibilidad con plantillas corporativas de entrada y salida, lo que facilita adopción, revisión y estandarización entre proyectos.
- Automatización de simulaciones térmicas 2D en bancos de ductos mediante FEMM y PyFEMM, incluyendo modos de ampacidad, temperatura y curvas I–T.
- Reducción del esfuerzo manual asociado al procesamiento por lotes, con una lógica reproducible y parametrizable.

6.3. Limitaciones

Las principales limitaciones identificadas son:

- La validación de **CableFunc** se basó en un lote específico y en supuestos globales definidos. Cambios en catálogos, criterios de disponibilidad o convenciones internas pueden modificar la coincidencia exacta de calibre.
- **EconFunc** compara alternativas cercanas (calibre técnico versus calibre superior inmediato). Esto prioriza decisiones aplicables en práctica, pero no explora múltiples alternativas superiores ni sensibilidades económicas en esta etapa.
- **DuctBankFunc** utiliza un modelo estacionario 2D. No incorpora efectos tridimensionales, transitorios térmicos ni ciertas condiciones particulares de obra civil que pueden ser relevantes en estudios de mayor detalle.

6.4. Mejoras y trabajo futuro

Como líneas de mejora para ampliar alcance y robustez, se propone:

- Ampliar bases de datos de cables y materiales, incorporando más fabricantes y configuraciones, con control de versiones de tablas y supuestos.
- Extender la validación con casos adicionales (distintos niveles de tensión, métodos de instalación y tipos de carga) y, cuando sea posible, contrastes con resultados de software comercial o antecedentes históricos del proyecto.

- Fortalecer el módulo térmico, incorporando geometrías adicionales, rellenos y condiciones de borde más representativas, y evaluando extensiones que capturen efectos fuera del plano cuando el caso lo requiera.
- Mejorar EconFunc incorporando comparación contra más de una alternativa superior, análisis de sensibilidad de parámetros económicos (precio de energía, tasa de descuento, factores de utilización) y reportes agregados por familia de circuitos.

En síntesis, la herramienta desarrollada cumple el propósito de estandarizar la selección de conductores y de mejorar la trazabilidad del proceso. Además, integra una base térmica por elementos finitos útil para bancos de ductos en condiciones donde el enfoque tabulado resulta limitado, sin requerir licencias comerciales adicionales para su ejecución.

Referencias

- [1] Cochilco, Ministerio de Minería del Gobierno de Chile, “Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales,” 2023, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.cochilco.cl/web/anuario-de-estadisticas-del-cobre-y-otros-minerales/>
- [2] Banco Central de Chile, “Memoria anual integrada 2022,” 2022, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.bcentral.cl/contenido/-/details/memoria-anual-integrada-2022>
- [3] Consejo Minero, “Minería en números,” 2025, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/mineria-en-numeros/>
- [4] C. C. C. D. C. A.G., “Información acerca de la empresa hatch ingenieros y consultores Ltda.” <https://www.canchamchile.cl/2024/02/15/hatch-ingenieros-y-consultores/>, 2025, accedido: Octubre, 2025.
- [5] Hatch Ltd., “Innovación en la industria minera,” 2025, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.hatch.com/es-CL/Expertise/Topics/Innovation-in-Mining>
- [6] Hatch Ltd, “Services and technologies: Mining,” 2025, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.hatch.com/es-CL/Expertise/Services-and-Technologies/Mining>
- [7] Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), *Pliego Técnico RIC N°3: Alimentadores y demanda de una instalación*, 2020, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2021/03/RIC-N03-Alimentadores-y-demanda-de-una-instalacion-V1.1-1.pdf>
- [8] —, *Pliego Técnico RIC N°4: Conductores, materiales y sistemas de canalización*, 2020, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2021/01/RIC-N04-Conductores-y-Canalizaciones.pdf>
- [9] —, “Decreto supremo n°8,” 2019, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1143069&idVersion=2020-03-05>
- [10] J. H. Neher and M. H. McGrath, “The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 76, no. 3, pp. 752–770, 1957.
- [11] N. F. P. Association, *National Electric Code - NFPA 70*, 2026, accedido: Octubre 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-70-standard-development/70>

- [12] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), “IEEE Std 835-1994 - ieee standard power cable ampacity tables,” <https://ieeexplore.ieee.org/document/40342>, 1994, iEEE standard, accessed April 2025.
- [13] Yunus A. Çengel and Afshin J. Ghajar, “Transferencia de Calor y Masa,” https://books.google.cl/books/about/Transferencia_de_calor_y_masa.html?id=vom4zQEACAAJ&source=kp_book_description&redir_esc=y, 2011, educational Book, accessed October 2025.
- [14] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, 1993, accedido: Abril 10, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/398556>
- [15] A. Systems, “Cable ladder systems for data center aisle containment,” 2026, [Online; accessed 12-January-2026]. [Online]. Available: <https://www.azesystems.com/cable-ladder-systems-for-data-center-aisle-containment.html>
- [16] C. E. Supply, “Electrical conduit (emt),” 2026, [Online; accessed 12-January-2026]. [Online]. Available: <https://consavvy.com/collections/electrical-conduit-emt>
- [17] G. C. Company, “Depth requirements for buried electrical cable,” 2026, [Online; accessed 12-January-2026]. [Online]. Available: <https://www.tgcccompany.com/depth-requirements-for-buried-electrical-cable/>
- [18] ElectDesign, “Duct bank (concrete encased),” 2026, [Online; accessed 12-January-2026]. [Online]. Available: <https://electdesign.ca/duct-bank-concrete-encased/>
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (Brown Book)*, 1997, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/761852>
- [20] International Electrotechnical Commission (IEC), *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*, 2017, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>
- [21] —, *IEC-60287-2-1: Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance*, 2023, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68134>
- [22] —, *IEC-60364-5-52: Low-voltage electrical installations – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems*, 2009, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>
- [23] —, *IEC-60502-1: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_n = 1,2 kV) up to 30 kV (U_n = 36 kV) - Part 1: Cables for*

- rated voltages of 1 kV ($U_n = 1,2$ kV) and 3 kV ($U_n = 3,6$ kV), 2004, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>
- [24] —, *IEC-60228: Conductors of Insulated Cables*, 2004, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>
- [25] —, *IEC-60502-2: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*, 2014, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>
- [26] N. F. P. Association, *National Electric Code Handbook - NFPA 70H*, 2026, accedido: Octubre 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-70-standard-development/70>
- [27] S. Conti, E. Dilettoso, and S. A. Rizzo, “Electromagnetic and thermal analysis of high voltage three-phase underground cables using finite element method,” in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2018, pp. 1–6.
- [28] G. J. Anders, M. Chaaban, N. Bedard, and R. W. D. Ganton, “New approach to ampacity evaluation of cables in ducts using finite element technique,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, no. 4, pp. 969–975, 1987.
- [29] G. Raithby and K. Hollands, “Laminar and turbulent heat transfer by natural convection,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 17, no. 12, pp. 1620–1622, 1974. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931074900702>
- [30] Y. Liang, “Steady-state thermal analysis of power cable systems in ducts using streamline-upwind/peirov-galerkin finite element method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 1, pp. 283–290, 2012.
- [31] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)*, 2001, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/974402>
- [32] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC-60364-4-43: Electrical installations of buildings - Part 4-43: Protection for safety - Protection against overcurrent*, 2001, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>
- [33] —, *IEC-60287-3-2: Electric cables — Calculation of the current rating - Part 3-2: Sections on operating conditions - Economic optimization of power cable size*, 2012, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64963>

- [34] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N. J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M. H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J. F. del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, and T. E. Oliphant, “Array programming with NumPy,” *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362, Sep. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- [35] Wes McKinney, *Pandas*, Version 2.3.3 (29Sep2025 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/index.html>
- [36] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burrowski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. J. Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. J. Carey, Í. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors, “SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python,” *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261–272, 2020.
- [37] John Hunter, *Matplotlib*, Version 3.10.8 (13Nov2025 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://matplotlib.org/>
- [38] Qt for Python Team, *PySide6 (Qt for Python project)*, Version 6.10 (8Oct2025 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/index.html>
- [39] M. Fitzpatrick, “Pyside6 widgets,” 2026, [Online; accessed 12-January-2026]. [Online]. Available: <https://www.pythonguis.com/tutorials/pyside6-widgets/>
- [40] David C. Meeker, *Finite Element Method Magnetism (FEMM)*, Version 4.2 (28Feb2018 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.femm.info>
- [41] —, *PyFEMM: A Python Interface to Finite Element Method Magnetism (FEMM)*, Version 0.1.3 (20Jul2021 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/pyFEMM>
- [42] Eric Garzoni, Charlie Clark, *OpenPyXL*, Version 3.1.5 (28Jun2024 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/>
- [43] David Cortesi, *PyInstaller*, Version 6.17.0 (24Nov2025 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://pyinstaller.org/en/stable/>
- [44] Soner Boztas, *InstallForge*, Version 1.6.1 (23Dec2025 Build), accedido: November 20, 2025. [Online]. Available: <https://installforge.net/>
- [45] Phelps Dodge, *Low Voltage Power and Control Cables Catalogue*, 2019, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: https://www.pdcable.com/wp-content/uploads/2019/09/Phelps-Dodge_Low-Voltage-Cable.pdf

- [46] Prysmian, *El libro blanco de la instalación: Media Tensión*, 2019, accedido: Abril 20, 2025. [Online]. Available: <https://es.prysmian.com/catalogos-online/prysmian/el-libro-blanco-de-la-instalacion-para-media-tension>
- [47] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. New York: Wiley, 2013, edición en español también disponible.

Anexos

Anexo A

Tablas de Ampacidad

A.1. Norma IEC 60364-5-52

A continuación se presentan las tablas de ampacidad de la IEC 60364-5-52 (baja tensión) utilizadas para el cálculo:

**Table B.52.5 – Current-carrying capacities in amperes
for methods of installation in Table B.52.1 –
XLPE or EPR insulation, three loaded conductors/copper or aluminium –
Conductor temperature: 90 °C, ambient temperature: 30 °C in air, 20 °C in ground**

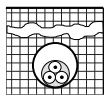
Nominal cross-sectional area of conductor mm ²	Installation methods of Table B.52.1						
	A1	A2	B1	B2	C	D1	D2
							
1	2	3	4	5	6	7	8
Copper							
1,5	17	16,5	20	19,5	22	21	23
2,5	23	22	28	26	30	28	30
4	31	30	37	35	40	36	39
6	40	38	48	44	52	44	49
10	54	51	66	60	71	58	65
16	73	68	88	80	96	75	84
25	95	89	117	105	119	96	107
35	117	109	144	128	147	115	129
50	141	130	175	154	179	135	153
70	179	164	222	194	229	167	188
95	216	197	269	233	278	197	226
120	249	227	312	268	322	223	257
150	285	259	342	300	371	251	287
185	324	295	384	340	424	281	324
240	380	346	450	398	500	324	375
300	435	396	514	455	576	365	419

Figura A.1: Tabla de ampacidades para conductores de baja tensión según IEC 60364-5-52 [22] (parte 1).

**Table B.52.12 – Current-carrying capacities in amperes
for installation methods E, F and G of Table B.52.1 –
XLPE or EPR insulation, copper conductors –
Conductor temperature: 90 °C, reference ambient temperature: 30 °C**

Nominal cross-sectional area of conductor mm ²	Installation methods of Table B.52.1						
	Multi-core cables		Single-core cables				
					Three loaded conductors, flat		
						Spaced	
							
	Method E	Method E	Method F	Method F	Method F	Method G	Method G
1	2	3	4	5	6	7	8
1,5	26	23	–	–	–	–	–
2,5	36	32	–	–	–	–	–
4	49	42	–	–	–	–	–
6	63	54	–	–	–	–	–
10	86	75	–	–	–	–	–
16	115	100	–	–	–	–	–
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	–	–	940	823	868	1085	1008
500	–	–	1083	946	998	1253	1169
630	–	–	1 254	1 088	1 151	1 454	1 362

Figura A.2: Tabla de ampacidades para conductores de baja tensión según IEC 60364-5-52 [22] (parte 2).

A.2. Norma IEC 60502-2

A continuación se presentan las tablas de ampacidad de la IEC 60502-2 (media tensión) utilizadas para el cálculo:

**Table B.2 – Current ratings for single-core cables with XLPE insulation –
Rated voltage 3,6/6 kV to 18/30 kV * –
Copper conductor**

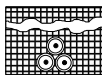
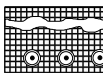
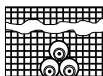
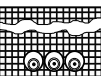
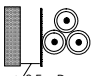
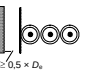
Nominal area of conductor	Buried direct in the ground		In single-way ducts		In air		
	Trefoil	Flat spaced	Trefoil ducts	Flat touching ducts	Trefoil	Flat touching	Flat spaced
							
mm ²	A	A	A	A	A	A	A
16	109	113	103	104	125	128	150
25	140	144	132	133	163	167	196
35	166	172	157	159	198	203	238
50	196	203	186	188	238	243	286
70	239	246	227	229	296	303	356
95	285	293	271	274	361	369	434
120	323	332	308	311	417	426	500
150	361	366	343	347	473	481	559
185	406	410	387	391	543	550	637
240	469	470	447	453	641	647	745
300	526	524	504	510	735	739	846
400	590	572	564	571	845	837	938
Maximum conductor temperature				90 °C			
Ambient air temperature				30 °C			
Ground temperature				20 °C			
Depth of laying				0,8 m			
Thermal resistivity of soil				1,5 K·m/W			
Thermal resistivity of earthenware ducts				1,2 K·m/W			
Screens bonded at both ends.							
* Current rating calculated for cables having a rated voltage of 6/10 kV.							

Figura A.3: Tablas de ampacidades para conductores de media tensión según IEC 60502-2 [25] (monoconductores).

**Table B.6 – Current rating for three-core XLPE insulated cables –
Rated voltage 3,6/6 kV to 18/30 kV * –
Copper conductor, armoured and unarmoured**

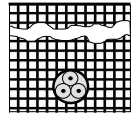
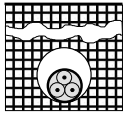
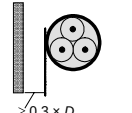
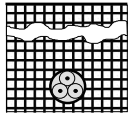
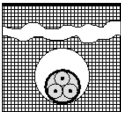
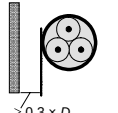
Nominal area of conductor	Unarmoured			Armoured		
	Buried direct in ground	In a buried duct	In air	Buried direct in ground	In a buried duct	In air
						
mm ²	A	A	A	A	A	A
16	101	87	109	101	88	110
25	129	112	142	129	112	143
35	153	133	170	154	134	172
50	181	158	204	181	158	205
70	221	193	253	220	194	253
95	262	231	304	263	232	307
120	298	264	351	298	264	352
150	334	297	398	332	296	397
185	377	336	455	374	335	453
240	434	390	531	431	387	529
300	489	441	606	482	435	599
400	553	501	696	541	492	683
Maximum conductor temperature			90 °C			
Ambient air temperature			30 °C			
Ground temperature			20 °C			
Depth of laying			0,8 m			
Thermal resistivity of soil			1,5 K·m/W			
Thermal resistivity of earthenware ducts			1,2 K·m/W			
* Current rating calculated for cables having a rated voltage of 6/10 kV.						

Figura A.4: Tablas de ampacidades para conductores de media tensión según IEC 60502-2 [25] (multiconductores).

A.3. Norma RIC N°4

A continuación se presentan las tablas de ampacidad de la RIC N°4 (baja tensión) utilizadas para el cálculo:

Tabla N°4.4: Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados

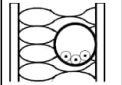
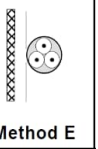
CABLES PARA TENDIDO FIJO TEMPERATURA DE SERVICIO 70 °C. Aplica para los conductores H07V, H07Z1, THWN, NYIFY, ACOMETIDA.				
Sección nominal [mm²]	Sección en sistema americano [AWG] o [kcmil]	A1	B1	Method E
		 Método de instalación A1. Temp. ambiente 30 °C	 Método de instalación B1. Temp. ambiente 30 °C	 Método de instalación E. Temp. ambiente 30 °C
1,5	-	14	16	19
2,08	14	16	19	22
2,5	-	18	21	24
3,31	12	21	25	30
4	-	24	28	31
5,26	10	28	34	38
6	-	31	36	43
8,37	8	38	45	53
10	-	42	50	60
13,3	6	50	60	71
16	-	56	68	80
21,1	4	66	80	91
25	-	73	89	101
26,7	3	76	93	106
33,6	2	87	108	122
35	-	89	110	126
42,4	1	100	125	142
50	-	108	134	153
53,5	1/0	116	144	165
67,4	2/0	133	167	191
70	-	136	171	196
85	3/0	153	193	222
95	-	164	207	238
107,2	4/0	176	223	257
120	-	188	239	276
126,7	250	195	248	286
150	-	216	262	319
152	300	217	264	321
177,3	350	239	289	355
185	-	245	296	364
202,7	400	259	315	386
240	-	286	346	430
253,3	500	296	356	446
300	-	328	394	497

Figura A.5: Tablas de ampacidades para conductores de baja tensión según normativa chilena RIC N°4 [8] (parte 1).

**Tabla N°4.4: Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados
(continuación)**

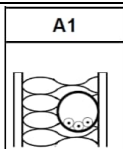
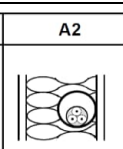
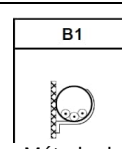
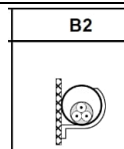
CABLES PARA TENDIDO FIJO TEMPERATURA DE SERVICIO 90 °C. APLICA a THHN, RV, RV-K, RZ1, RZ1-K.					
Sección nominal [mm²]	Sección en sistema americano [AWG] o [kcmil]	A1	A2	B1	B2
		 Método de instalación A1. Temp. ambiente 30 °C	 Método de instalación A2. Temp. ambiente 30 °C	 Método de instalación B1. Temp. ambiente 30 °C	 Método de instalación B2. Temp. ambiente 30 °C
1,5	-	17	17	18	19
2,08	14	21	20	24	24
2,5	-	23	22	24	24
3,31	12	28	26	31	31
4	-	31	30	37	35
5,26	10	37	35	39	38
6	-	40	38	48	44
8,37	8	49	46	59	54
10	-	54	51	66	60
13,3	6	65	61	79	72
16	-	73	68	88	80
21,1	4	86	80	105	95
25	-	95	89	117	105
26,7	3	99	92	122	109
33,6	2	114	106	141	125
35	-	117	109	144	128
42,4	1	132	122	163	144
50	-	141	130	175	154
53,5	1/0	152	140	188	165
67,4	2/0	175	161	217	190
70	-	179	164	222	194
85	3/0	201	185	251	218
95	-	216	197	269	233
107,2	4/0	232	212	290	251
120	-	249	227	312	268
126,7	250	257	234	322	277
150	-	285	259	342	300
152	300	287	261	344	302
177,3	350	316	287	374	331
185	-	324	295	384	340
202,7	400	342	312	405	358
240	-	380	346	450	398
253,3	500	392	357	464	410
300	-	435	396	514	455

Figura A.6: Tablas de ampacidades para conductores de baja tensión según normativa chilena RIC N°4 [8] (parte 2).

Tabla N°4.4: Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislados
(continuación)

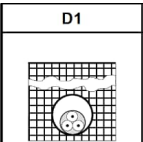
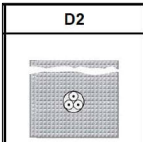
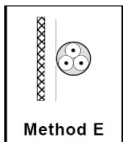
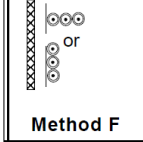
CABLES PARA TENDIDO FIJO TEMPERATURA DE SERVICIO 90°C. APLICA a THHN, RV, RV-K,RZ1, RZ1-K.					
Sección nominal [mm²]	Sección en sistema americano [AWG] o [kcmil]	 Método de instalación D1. Temp. ambiente 20°C	 Método de instalación D2. Temp. ambiente 20°C	 Method E Método de instalación E. Temp. ambiente 30°C	 Method F Método de instalación F. Temp. ambiente 30°C
1,5	-	19	23	19	-
2,08	14	30	31	28	-
2,5	-	33	38	32	-
3,31	12	38	39	38	-
4	-	42	59	42	42
5,26	10	48	69	50	50
6	-	52	74	54	55
8,37	8	63	89	67	68
10	-	68	98	75	77
13,3	6	80	114	89	93
16	-	89	126	100	105
21,1	4	103	147	114	126
25	-	113	161	127	141
26,7	3	117	167	133	147
33,6	2	132	189	154	172
35	-	136	194	158	176
42,4	1	150	216	178	200
50	-	159	230	192	216
53,5	1/0	170	245	207	234
67,4	2/0	192	278	240	273
70	-	197	282	246	279
85	3/0	218	315	278	318
95	-	232	339	298	342
107,2	4/0	248	362	322	371
120	-	263	386	346	400
126,7	250	270	396	358	415
150	-	296	431	399	464
152	300	299	437	402	468
177,3	350	325	474	444	518
185	-	332	486	456	533
202,7	400	349	510	483	567
240	-	382	563	538	634
253,3	500	393	576	557	657
300	-	431	629	621	736

Figura A.7: Tablas de ampacidades para conductores de baja tensión según normativa chilena RIC N°4 [8] (parte 3).

A.4. Norma NFPA-70

A continuación se presentan las tablas de ampacidad de la NEC (baja tensión) utilizadas para el cálculo:

Table 310.15(B)(16) (formerly Table 310.16) Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated Up to and Including 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)*

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(A).]						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM				
18**	—	—	14	—	—	—	—
16**	—	—	18	—	—	—	—
14**	15	20	25	—	—	—	—
12**	20	25	30	15	20	25	12**
10**	30	35	40	25	30	35	10**
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	195	230	260	300
350	260	310	350	210	250	280	350
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	350	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	315	375	425	700
750	400	475	535	320	385	435	750
800	410	490	555	330	395	445	800
900	435	520	585	355	425	480	900
1000	455	545	615	375	445	500	1000
1250	495	590	665	405	485	545	1250
1500	525	625	705	435	520	585	1500
1750	545	650	735	455	545	615	1750
2000	555	665	750	470	560	630	2000

Figura A.8: Tabla general de ampacidades para tensiones inferiores a 2000 V según NEC [11].

Además se recomienda el uso de las siguientes tablas (extraídas del Anexo B) para configuraciones más específicas, por ejemplo, en banco de ductos con resistividades variadas del suelo:

Anexo A. Tablas de Ampacidad

Table B.310.15(B)(2)(7) Ampacities of Three Single Insulated Conductors, Rated 0 Through 2000 Volts, in Underground Electrical Ducts (Three Conductors per Electrical Duct) Based on Ambient Earth Temperature of 20°C (68°F), Electrical Duct Arrangement in Accordance with Figure B.310.15(B)(2)(2), Conductor Temperature 75°C (167°F)

Size (AWG or kcmil)	1 Electrical Duct [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 1]			3 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 2]			6 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 3]			1 Electrical Duct [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 1]			3 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 2]			6 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 3]			Size (AWG or kcmil)
	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			
	COPPER									ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM									
	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	
	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	
	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	
	50	100	100	50	100	100	50	100	100	50	100	100	50	100	100	50	100	100	
8	63	58	57	61	51	49	57	44	41	49	45	44	47	40	38	45	34	32	8
6	84	77	75	80	67	63	75	56	53	66	60	58	63	52	49	59	44	41	6
4	111	100	98	105	86	81	98	73	67	86	78	76	79	67	63	77	57	52	4
3	129	116	113	122	99	94	113	83	77	101	91	89	83	77	73	84	65	60	3
2	147	132	128	139	112	106	129	93	86	115	103	100	108	87	82	101	73	67	2
1	171	153	148	161	128	121	149	106	98	133	119	115	126	100	94	116	83	77	1
1/0	197	175	169	185	146	137	170	121	111	153	136	132	144	114	107	133	94	87	1/0
2/0	226	200	193	212	166	156	194	136	126	176	156	151	165	130	121	151	106	98	2/0
3/0	260	228	220	243	189	177	222	154	142	203	178	172	189	147	138	173	121	111	3/0
4/0	301	263	253	280	215	201	255	175	161	235	205	198	219	168	157	199	137	126	4/0
250	334	290	279	310	236	220	281	192	176	261	227	218	242	185	172	220	150	137	250
300	373	321	308	344	260	242	310	210	192	293	252	242	272	204	190	245	165	151	300
350	409	351	337	377	283	264	340	228	209	321	276	265	296	222	207	266	179	164	350
400	442	376	361	394	302	280	368	243	223	349	297	284	321	238	220	288	191	174	400
500	503	427	409	460	341	316	412	273	249	397	338	323	364	270	250	326	216	197	500
600	552	468	447	511	371	343	457	296	270	446	373	356	408	296	274	365	236	215	600
700	602	509	486	553	402	371	492	319	291	488	408	389	443	321	297	394	255	232	700
750	632	529	505	574	417	385	509	330	301	508	425	405	461	334	309	409	265	241	750
800	654	544	520	597	428	395	527	338	308	530	439	418	481	344	318	427	273	247	800
900	692	575	549	628	450	415	554	355	323	563	466	444	510	365	337	450	288	261	900
1000	730	605	576	659	472	435	581	372	338	597	494	471	538	385	355	475	304	276	1000
Ambient Temp. (°C)	Correction Factors																		Ambient Temp. (°F)
6–10	1.09			1.09			1.09			1.09			1.09			1.09			43–50
11–15	1.04			1.04			1.04			1.04			1.04			1.04			52–59
16–20	1.00			1.00			1.00			1.00			1.00			1.00			61–68
21–25	0.95			0.95			0.95			0.95			0.95			0.95			70–77
26–30	0.90			0.90			0.90			0.90			0.90			0.90			79–86

Figura A.9: Tabla de ampacidades para monoconductores en ductos subterráneos según NEC para tensiones inferiores a 2000 V [11].

Table B.310.15(B)(2)(6) Ampacities of Three Insulated Conductors, Rated 0 Through 2000 Volts, Within an Overall Covering (Three-Conductor Cable) in Underground Electrical Ducts (One Cable per Electrical Duct) Based on Ambient Earth Temperature of 20°C (68°F), Electrical Duct Arrangement in Accordance with Figure B.310.15(B)(2)(2), Conductor Temperature 75°C (167°F)

Size (AWG or kcmil)	1 Electrical Duct [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 1]			3 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 2]			6 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 3]			1 Electrical Duct [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 1]			3 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 2]			6 Electrical Ducts [Fig. B.310.15(B)(2)(2), Detail 3]			Size (AWG or kcmil)
	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE			Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE						
	COPPER									ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM									
	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO	RHO		
	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	
	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF	LF		
	50	100	100	50	100	100	50	100	100	50	100	100	50	100	100	50	100	100	
8	58	54	53	56	48	46	53	42	39	45	42	41	43	37	36	41	32	30	8
6	77	71	69	74	63	60	70	54	51	60	55	54	57	49	47	54	42	39	6
4	101	93	91	96	81	77	91	69	65	78	72	71	75	63	60	71	54	51	4
2	132	121	118	126	105	100	119	89	83	103	94	92	98	82	78	92	70	65	2
1	154	140	136	146	121	114	137	102	95	120	109	106	114	94	89	107	79	74	1
1/0	177	160	156	168	137	130	157	116	107	138	125	122	131	107	101	122	90	84	1/0
2/0	203	183	178	192	156	147	179	131	121	158	143	139	150	122	115	140	102	95	2/0
3/0	233	210	204	221	178	158	205	148	137	182	164	159	172	139	131	160	116	107	3/0
4/0	268	240	232	253	202	190	234	168	155	209	187	182	198	158	149	183	131	121	4/0
250	297	265	256	280	222	209	258	184	169	233	207	201	219	174	163	202	144	132	250
350	363	321	310	340	267	250	312	219	202	285	252	244	267	209	196	245	172	158	350
500	444	389	375	414	320	299	377	261	240	352	308	297	328	254	237	299	207	190	500
750	552	478	459	511	388	362	462	314	288	446	386	372	413	314	293	374	254	233	750
1000	628	539	518	579	435	405	522	351	321	521	447	430	480	361	336	433	291	266	1000
Ambient Temp. (°C)	Correction Factors																		Ambient Temp. (°F)
6–10	1.09			1.09			1.09			1.09			1.09			1.09			43–50
11–15	1.04			1.04			1.04			1.04			1.04			1.04			52–59
16–20	1.00			1.00			1.00			1.00			1.00			1.00			61–68
21–25	0.95			0.95			0.95			0.95			0.95			0.95			70–77
26–30	0.90			0.90			0.90			0.90			0.90			0.90			79–86

Figura A.10: Tabla de ampacidades para multiconductores en ductos subterráneos según NEC para tensiones inferiores a 2000 V [11].

Anexo A. Tablas de Ampacidad

Para el caso de tensiones superiores a 2000 V pero inferiores a 35000 V, la NEC recomienda el uso de las siguientes tablas de ampacidad:

Table 310.60(C)(67) Ampacities of Insulated Single Copper Conductor Cables Triplexed in Air Based on Conductor Temperatures of 90°C (194°F) and 105°C (221°F) and Ambient Air Temperature of 40°C (104°F)*

Conductor Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(C).]			
	2001–5000 Volts Ampacity		5001–35,000 Volts Ampacity	
	90°C (194°F)	105°C (221°F)	90°C (194°F)	105°C (221°F)
	Type MV-90	Type MV-105	Type MV-90	Type MV-105
8	65	74	—	—
6	90	99	100	110
4	120	130	130	140
2	160	175	170	195
1	185	205	195	225
1/0	215	240	225	255
2/0	250	275	260	295
3/0	290	320	300	340
4/0	335	375	345	390
250	375	415	380	430
350	465	515	470	525
500	580	645	580	650
750	750	835	730	820
1000	880	980	850	950

*Refer to 310.60(C)(4) for the ampacity correction factors where the ambient air temperature is other than 40°C (104°F).

(a) Ampacidades para monoconductores

Table 310.60(C)(71) Ampacities of an Insulated Three-Conductor Copper Cable Isolated in Air Based on Conductor Temperatures of 90°C (194°F) and 105°C (221°F) and Ambient Air Temperature of 40°C (104°F)*

Conductor Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(C).]			
	2001–5000 Volts Ampacity		5001–35,000 Volts Ampacity	
	90°C (194°F)	105°C (221°F)	90°C (194°F)	105°C (221°F)
	Type MV-90	Type MV-105	Type MV-90	Type MV-105
8	59	66	—	—
6	79	88	93	105
4	105	115	120	135
2	140	154	165	185
1	160	180	185	210
1/0	185	205	215	240
2/0	215	240	245	275
3/0	250	280	285	315
4/0	285	320	325	360
250	320	355	360	400
350	395	440	435	490
500	485	545	535	600
750	615	685	670	745
1000	705	790	770	860

*Refer to 310.60(C)(4) for the ampacity correction factors where the ambient air temperature is other than 40°C (104°F).

(b) Ampacidades para multiconductores

Figura A.11: Ampacidades para conductores en aire según NEC en Media Tensión [11].

Table 310.60(C)(77) Ampacities of Three Single-Insulated Copper Conductors in Underground Electrical Ducts (Three Conductors per Electrical Duct) Based on Ambient Earth Temperature of 20°C (68°F), Electrical Duct Arrangement in Accordance with Figure 310.60(C)(3), 100 Percent Load Factor, Thermal Resistance (RHO) of 90, Conductor Temperatures of 90°C (194°F) and 105°C (221°F)

Conductor Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(C).]			
	2001–5000 Volts Ampacity		5001–35,000 Volts Ampacity	
	90°C (194°F)	105°C (221°F)	90°C (194°F)	105°C (221°F)
	Type MV-90	Type MV-105	Type MV-90	Type MV-105
One Circuit [See Figure 310.60(C)(3), Detail 1.]				
8	64	69	—	—
6	85	92	90	97
4	110	120	115	125
2	145	155	155	165
1	170	180	175	185
1/0	195	210	200	215
2/0	220	235	230	245
3/0	250	270	260	275
4/0	290	310	295	315
250	320	345	325	345
350	385	415	390	415
500	470	505	465	500
750	585	630	565	610
1000	670	720	640	690

(a) Ampacidades para monoconductores

Table 310.60(C)(79) Ampacities of Three Insulated Copper Conductors Cabled Within an Overall Covering (Three-Conductor Cable) in Underground Electrical Ducts (One Cable per Electrical Duct) Based on Ambient Earth Temperature of 20°C (68°F), Electrical Duct Arrangement in Accordance with Figure 310.60(C)(3), 100 Percent Load Factor, Thermal Resistance (RHO) of 90, Conductor Temperatures of 90°C (194°F) and 105°C (221°F)

Conductor Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(C).]			
	2001–5000 Volts Ampacity		5001–35,000 Volts Ampacity	
	90°C (194°F)	105°C (221°F)	90°C (194°F)	105°C (221°F)
	Type MV-90	Type MV-105	Type MV-90	Type MV-105
One Circuit [See Figure 310.60(C)(3), Detail 1.]				
8	59	64	—	—
6	78	84	88	95
4	100	110	115	125
2	135	145	150	160
1	155	165	170	185
1/0	175	190	195	210
2/0	200	220	220	235
3/0	230	250	250	270
4/0	265	285	285	305
250	290	315	310	335
350	355	380	375	400
500	430	460	450	485
750	530	570	545	585
1000	600	645	615	660

(b) Ampacidades para multiconductores

Figura A.12: Ampacidades para conductores en ductos según NEC en Media Tensión [11].

Anexo A. Tablas de Ampacidad

Table 310.60(C)(81) Ampacities of Single Insulated Copper Conductors Directly Buried in Earth Based on Ambient Earth Temperature of 20°C (68°F), Arrangement per Figure 310.60(C)(3), 100 Percent Load Factor, Thermal Resistance (RHO) of 90, Conductor Temperatures of 90°C (194°F) and 105°C (221°F)

Conductor Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(C).]			
	2001–5000 Volts Ampacity		5001–35,000 Volts Ampacity	
	90°C (194°F) Type MV-90	105°C (221°F) Type MV-105	90°C (194°F) Type MV-90	105°C (221°F) Type MV-105
One Circuit, Three Conductors [See Figure 310.60(C)(3), Detail 9.]				
8	110	115	—	—
6	140	150	130	140
4	180	195	170	180
2	230	250	210	225
1	260	280	240	260
1/0	295	320	275	295
2/0	335	365	310	335
3/0	385	415	355	380
4/0	435	465	405	435
250	470	510	440	475
350	570	615	535	575
500	690	745	650	700
750	845	910	805	865
1000	980	1055	930	1005

(a) Ampacidades para monoconductores

Table 310.60(C)(83) Ampacities of Three Insulated Copper Conductors Cabled Within an Overall Covering (Three-Conductor Cable), Directly Buried in Earth Based on Ambient Earth Temperature of 20°C (68°F), Arrangement per Figure 310.60(C)(3), 100 Percent Load Factor, Thermal Resistance (RHO) of 90, Conductor Temperatures of 90°C (194°F) and 105°C (221°F)

Conductor Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(C).]			
	2001–5000 Volts Ampacity		5001–35,000 Volts Ampacity	
	90°C (194°F) Type MV-90	105°C (221°F) Type MV-105	90°C (194°F) Type MV-90	105°C (221°F) Type MV-105
One Circuit [See Figure 310.60(C)(3), Detail 5.]				
8	85	89	—	—
6	105	115	115	120
4	135	150	145	155
2	180	190	185	200
1	200	215	210	225
1/0	230	245	240	255
2/0	260	280	270	290
3/0	295	320	305	330
4/0	335	360	350	375
250	365	395	380	410
350	440	475	460	495
500	530	570	550	590
750	650	700	665	720
1000	730	785	750	810

(b) Ampacidades para multiconductores

Figura A.13: Ampacidades para conductores directamente enterrados según NEC en Media Tensión [11].

Anexo B

Factores de corrección

A continuación se presentan los factores de corrección por temperatura y agrupamiento que deben ser considerados para cada una de las normativas referenciadas:

B.1. Norma IEC 60364-5-52

Table B.52.14 – Correction factor for ambient air temperatures other than 30 °C to be applied to the current-carrying capacities for cables in the air

Ambient temperature ^a °C	Insulation			
	PVC	XLPE and EPR	Mineral ^a	
			PVC covered or bare and exposed to touch 70 °C	Bare not exposed to touch 105 °C
10	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,17	1,12	1,20	1,11
20	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,06	1,04	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,79	0,87	0,78	0,88
50	0,71	0,82	0,67	0,84
55	0,61	0,76	0,57	0,80
60	0,50	0,71	0,45	0,75
65	–	0,65	–	0,70
70	–	0,58	–	0,65
75	–	0,50	–	0,60
80	–	0,41	–	0,54
85	–	–	–	0,47
90	–	–	–	0,40
95	–	–	–	0,32

^a For higher ambient temperatures, consult the manufacturer.

Figura B.1: Factores de corrección para temperaturas ambiente distintas de 30°C para cables en aire según IEC 60364-5-52 [22].

Table B.52.15 – Correction factors for ambient ground temperatures other than 20 °C to be applied to the current-carrying capacities for cables in ducts in the ground

Ground temperature °C	Insulation	
	PVC	XLPE and EPR
10	1,10	1,07
15	1,05	1,04
20	1,00	1,00
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65
65	—	0,60
70	—	0,53
75	—	0,46
80	—	0,38

Figura B.2: Factores de corrección para temperaturas del suelo distintas de 20°C para cables en medios subterráneos según IEC 60364-5-52 [22].

Table B.52.16 – Correction factors for cables buried direct in the ground or in buried ducts for soil thermal resistivities other than 2,5 K·m/W to be applied to the current-carrying capacities for reference method D

Thermal resistivity, K·m/W	0,5	0,7	1	1,5	2	2,5	3
Correction factor for cables in buried ducts	1,28	1,20	1,18	1,1	1,05	1	0,96
Correction factor for direct buried cables	1,88	1,62	1,5	1,28	1,12	1	0,90
NOTE 1 The correction factors given have been averaged over the range of conductor sizes and types of installation included in Tables B.52.2 to B.52.5. The overall accuracy of correction factors is within $\pm 5\%$. NOTE 2 The correction factors are applicable to cables drawn into buried ducts; for cables laid direct in the ground the correction factors for thermal resistivities less than 2,5 K·m/W will be higher. Where more precise values are required they may be calculated by methods given in the IEC 60287 series. NOTE 3 The correction factors are applicable to ducts buried at depths of up to 0,8 m. NOTE 4 It is assumed that the soil properties are uniform. No allowance had been made for the possibility of moisture migration which can lead to a region of high thermal resistivity around the cable. If partial drying out of the soil is foreseen, the permissible current rating should be derived by the methods specified in the IEC 60287 series.							

Figura B.3: Factores de corrección para resistividades del suelo distintas de 2,5 K·m/W para cables en medios subterráneos según IEC 60364-5-52 [22].

Table B.52.21 – Reduction factors for groups of one or more circuits of single-core cables to be applied to reference current-carrying capacity for one circuit of single-core cables in free air – Method of installation F in Tables B.52.8 to B.52.13

Method of installation in Table A.52.3			Number of trays or ladders	Number of three-phase circuits per tray or ladder			Use as a multiplier to current-carrying capacity for
				1	2	3	
Perforated cable tray systems (note 3)	31		1 2 3	0,98 0,96 0,95	0,91 0,87 0,85	0,87 0,81 0,78	Three cables in horizontal formation
Vertical perforated cable tray systems (note 4)	31		1 2	0,96 0,95	0,86 0,84	– –	Three cables in vertical formation
Cable ladder systems, cleats, etc. (note 3)	32 33 34		1 2 3	1,00 0,98 0,97	0,97 0,93 0,90	0,96 0,89 0,86	Three cables in horizontal formation
Perforated cable tray systems (note 3)	31		1 2 3	1,00 0,97 0,96	0,98 0,93 0,92	0,96 0,89 0,86	Three cables in trefoil formation
Vertical perforated cable tray systems (note 4)	31		1 2	1,00 1,00	0,91 0,90	0,89 0,86	
Cable ladder systems, cleats, etc. (note 3)	32 33 34		1 2 3	1,00 0,97 0,96	1,00 0,95 0,94	1,00 0,93 0,90	

Figura B.4: Factores de corrección para monoconductores en canalizaciones en aire según IEC 60364-5-52 [22].

Table B.52.20 – Reduction factors for group of more than one multi-core cable to be applied to reference current-carrying capacities for multi-core cables in free air – Method of installation E in Tables B.52.8 to B.52.13

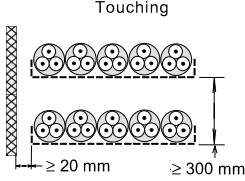
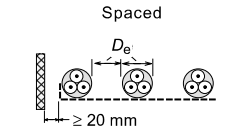
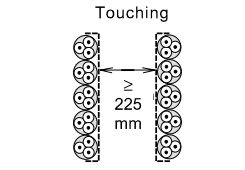
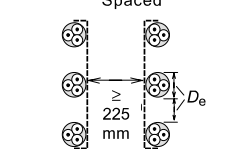
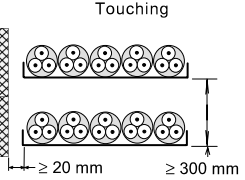
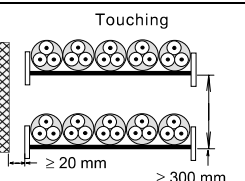
Method of installation in Table A.52.3			Number of trays or ladders	Number of cables per tray or ladder					
				1	2	3	4	6	9
Perforated cable tray systems (note 3)	31	 Touching	1	1,00	0,88	0,82	0,79	0,76	0,73
			2	1,00	0,87	0,80	0,77	0,73	0,68
			3	1,00	0,86	0,79	0,76	0,71	0,66
			6	1,00	0,84	0,77	0,73	0,68	0,64
		 Spaced	1	1,00	1,00	0,98	0,95	0,91	—
			2	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	—
			3	1,00	0,98	0,95	0,91	0,85	—
Vertical perforated cable tray systems (note 4)	31	 Touching	1	1,00	0,88	0,82	0,78	0,73	0,72
			2	1,00	0,88	0,81	0,76	0,71	0,70
		 Spaced	1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,87	—
			2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,85	—
Unperforated cable tray systems	31	 Touching	1	0,97	0,84	0,78	0,75	0,71	0,68
			2	0,97	0,83	0,76	0,72	0,68	0,63
			3	0,97	0,82	0,75	0,71	0,66	0,61
			6	0,97	0,81	0,73	0,69	0,63	0,58
Cable ladder systems, cleats, etc. (note 3)	32 33 34	 Touching	1	1,00	0,87	0,82	0,80	0,79	0,78
			2	1,00	0,86	0,80	0,78	0,76	0,73
			3	1,00	0,85	0,79	0,76	0,73	0,70
			6	1,00	0,84	0,77	0,73	0,68	0,64

Figura B.5: Factores de corrección para multiconductores en canalizaciones en aire según IEC 60364-5-52 [22].

Table B.52.17 – Reduction factors for one circuit or one multi-core cable or for a group of more than one circuit, or more than one multi-core cable, to be used with current-carrying capacities of Tables B.52.2 to B.52.13

Item	Arrangement (cables touching)	Number of circuits or multi-core cables												To be used with current-carrying capacities, reference
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20	
1	Bunched in air, on a surface, embedded or enclosed	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	B.52.2 to B.52.13 Methods A to F
2	Single layer on wall, floor or unperforated cable tray systems	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	No further reduction factor for more than nine circuits or multicore cables			B.52.2 to B.52.7 Method C
3	Single layer fixed directly under a wooden ceiling	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				B.52.8 to B.52.13 Methods E and F
4	Single layer on a perforated horizontal or vertical cable tray systems	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				
5	Single layer on cable ladder systems or cleats etc.,	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

NOTE 1 These factors are applicable to uniform groups of cables, equally loaded.

NOTE 2 Where horizontal clearances between adjacent cables exceeds twice their overall diameter, no reduction factor need be applied.

NOTE 3 The same factors are applied to:
– groups of two or three single-core cables;
– multi-core cables.

NOTE 4 If a system consists of both two- and three-core cables, the total number of cables is taken as the number of circuits, and the corresponding factor is applied to the tables for two loaded conductors for the two-core cables, and to the tables for three loaded conductors for the three-core cables.

NOTE 5 If a group consists of n single-core cables it may either be considered as $n/2$ circuits of two loaded conductors or $n/3$ circuits of three loaded conductors.

NOTE 6 The values given have been averaged over the range of conductor sizes and types of installation included in Tables B.52.2 to B.52.13 the overall accuracy of tabulated values is within 5 %.

NOTE 7 For some installations and for other methods not provided for in the above table, it may be appropriate to use factors calculated for specific cases, see for example Tables B.52.20 and B.52.21.

Figura B.6: Factores de corrección para conductores en canalizaciones del tipo conduit (no subterráneas) según IEC 60364-5-52 [22].

Table B.52.19 – Reduction factors for more than one circuit, cables laid in ducts in the ground – Installation method D1 in Tables B.52.2 to B.52.5

A) Multi-core cables in single-way ducts				
Number of cables	Duct to duct clearance ^a			
	Nil (ducts touching)	0,25 m	0,5 m	1,0 m
2	0,85	0,90	0,95	0,95
3	0,75	0,85	0,90	0,95
4	0,70	0,80	0,85	0,90
5	0,65	0,80	0,85	0,90
6	0,60	0,80	0,80	0,90
7	0,57	0,76	0,80	0,88
8	0,54	0,74	0,78	0,88
9	0,52	0,73	0,77	0,87
10	0,49	0,72	0,76	0,86
11	0,47	0,70	0,75	0,86
12	0,45	0,69	0,74	0,85
13	0,44	0,68	0,73	0,85
14	0,42	0,68	0,72	0,84
15	0,41	0,67	0,72	0,84
16	0,39	0,66	0,71	0,83
17	0,38	0,65	0,70	0,83
18	0,37	0,65	0,70	0,83
19	0,35	0,64	0,69	0,82
20	0,34	0,63	0,68	0,82

(a) Factores para multiconductores

B) Single-core cables in non-magnetic single-way ducts				
Number of single-core circuits of two or three cables	Duct to duct clearance ^a			
	Nil (ducts touching)	0,25 m	0,5 m	1,0 m
2	0,80	0,90	0,90	0,95
3	0,70	0,80	0,85	0,90
4	0,65	0,75	0,80	0,90
5	0,60	0,70	0,80	0,90
6	0,60	0,70	0,80	0,90
7	0,53	0,66	0,76	0,87
8	0,50	0,63	0,74	0,87
9	0,47	0,61	0,73	0,86
10	0,45	0,59	0,72	0,85
11	0,43	0,57	0,70	0,85
12	0,41	0,56	0,69	0,84
13	0,39	0,54	0,68	0,84
14	0,37	0,53	0,68	0,83
15	0,35	0,52	0,67	0,83
16	0,34	0,51	0,66	0,83
17	0,33	0,50	0,65	0,82
18	0,31	0,49	0,65	0,82
19	0,30	0,48	0,64	0,82
20	0,29	0,47	0,63	0,81

(b) Factores para monoconductores

Figura B.7: Factores de corrección para conductores en ductos ubicados horizontalmente entre sí según IEC 60364-5-52 [22].

B.2. Norma IEC 60502-2

Table B.10 – Correction factors for ambient air temperatures other than 30 °C

Maximum conductor temperature °C	Ambient air temperature °C							
	20	25	35	40	45	50	55	60
90	1,08	1,04	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71

Figura B.8: Factores de corrección para temperaturas ambiente distintas de 30°C para cables en aire según IEC 60502-2 [25].

Table B.11 – Correction factors for ambient ground temperatures other than 20 °C

Maximum conductor temperature °C	Ambient ground temperature °C							
	10	15	25	30	35	40	45	50
90	1,07	1,04	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76

Figura B.9: Factores de corrección para temperaturas del suelo distintas de 20°C para cables en medios subterráneos según IEC 60502-2 [25].

Table B.12 – Correction factors for depths of laying other than 0,8 m for direct buried cables

Depth of laying m	Single-core cables		Three-core cables
	Nominal conductor size mm ²		
	≤185 mm ²	>185 mm ²	
0,5	1,04	1,06	1,04
0,6	1,02	1,04	1,03
1	0,98	0,97	0,98
1,25	0,96	0,95	0,96
1,5	0,95	0,93	0,95
1,75	0,94	0,91	0,94
2	0,93	0,90	0,93
2,5	0,91	0,88	0,91
3	0,90	0,86	0,90

Table B.13 – Correction factors for depths of laying other than 0,8 m for cables in ducts

Depth of laying m	Single-core cables		Three-core cable
	Nominal conductor size mm ²		
	≤185 mm ²	>185 mm ²	
0,5	1,04	1,05	1,03
0,6	1,02	1,03	1,02
1	0,98	0,97	0,99
1,25	0,96	0,95	0,97
1,5	0,95	0,93	0,96
1,75	0,94	0,92	0,95
2	0,93	0,91	0,94
2,5	0,91	0,89	0,93
3	0,90	0,88	0,92

Figura B.10: Factores de corrección de acuerdo a profundidad de enterrado de los conductores según IEC 60502-2 [25].

Table B.14 – Correction factors for soil thermal resistivities other than 1,5 K·m/W for direct buried single-core cables

Nominal area of conductor mm ²	Values of soil thermal resistivity K·m/W						
	0,7	0,8	0,9	1	2	2,5	3
16	1,29	1,24	1,19	1,15	0,89	0,82	0,75
25	1,30	1,25	1,20	1,16	0,89	0,81	0,75
35	1,30	1,25	1,21	1,16	0,89	0,81	0,75
50	1,32	1,26	1,21	1,16	0,89	0,81	0,74
70	1,33	1,27	1,22	1,17	0,89	0,81	0,74
95	1,34	1,28	1,22	1,18	0,89	0,80	0,74
120	1,34	1,28	1,22	1,18	0,88	0,80	0,74
150	1,35	1,28	1,23	1,18	0,88	0,80	0,74
185	1,35	1,29	1,23	1,18	0,88	0,80	0,74
240	1,36	1,29	1,23	1,18	0,88	0,80	0,73
300	1,36	1,30	1,24	1,19	0,88	0,80	0,73
400	1,37	1,30	1,24	1,19	0,88	0,79	0,73

Table B.15 – Correction factors for soil thermal resistivities other than 1,5 K·m/W single-core cables in buried ducts

Nominal area of conductor mm ²	Values of soil thermal resistivity K·m/W						
	0,7	0,8	0,9	1	2	2,5	3
16	1,20	1,17	1,14	1,11	0,92	0,85	0,79
25	1,21	1,17	1,14	1,12	0,91	0,85	0,79
35	1,21	1,18	1,15	1,12	0,91	0,84	0,79
50	1,21	1,18	1,15	1,12	0,91	0,84	0,78
70	1,22	1,19	1,15	1,12	0,91	0,84	0,78
95	1,23	1,19	1,16	1,13	0,91	0,84	0,78
120	1,23	1,20	1,16	1,13	0,91	0,84	0,78
150	1,24	1,20	1,16	1,13	0,91	0,83	0,78
185	1,24	1,20	1,17	1,13	0,91	0,83	0,78
240	1,25	1,21	1,17	1,14	0,90	0,83	0,77
300	1,25	1,21	1,17	1,14	0,90	0,83	0,77
400	1,25	1,21	1,17	1,14	0,90	0,83	0,77

Figura B.11: Factores de corrección para resistividades del suelo distintas de 1,5 K·m/W para cables monoconductores en medios subterráneos según IEC 60502-2 [25].

Table B.16 – Correction factors for soil thermal resistivities other than 1,5 K·m/W for direct buried three-core cables

Nominal area of conductor mm ²	Values of soil thermal resistivity K·m/W						
	0,7	0,8	0,9	1	2	2,5	3
16	1,23	1,19	1,16	1,13	0,91	0,84	0,78
25	1,24	1,20	1,16	1,13	0,91	0,84	0,78
35	1,25	1,21	1,17	1,13	0,91	0,83	0,78
50	1,25	1,21	1,17	1,14	0,91	0,83	0,77
70	1,26	1,21	1,18	1,14	0,90	0,83	0,77
95	1,26	1,22	1,18	1,14	0,90	0,83	0,77
120	1,26	1,22	1,18	1,14	0,90	0,83	0,77
150	1,27	1,22	1,18	1,15	0,90	0,83	0,77
185	1,27	1,23	1,18	1,15	0,90	0,83	0,77
240	1,28	1,23	1,19	1,15	0,90	0,83	0,77
300	1,28	1,23	1,19	1,15	0,90	0,82	0,77
400	1,28	1,23	1,19	1,15	0,90	0,82	0,76

Table B.17 – Correction factors for soil thermal resistivities other than 1,5 K·m/W for three-core cables in ducts

Nominal area of conductor mm ²	Values of soil thermal resistivity K·m/W						
	0,7	0,8	0,9	1	2	2,5	3
16	1,12	1,11	1,09	1,08	0,94	0,89	0,84
25	1,14	1,12	1,10	1,08	0,94	0,89	0,84
35	1,14	1,12	1,10	1,08	0,94	0,88	0,84
50	1,14	1,12	1,10	1,08	0,94	0,88	0,84
70	1,15	1,13	1,11	1,09	0,94	0,88	0,83
95	1,15	1,13	1,11	1,09	0,94	0,88	0,83
120	1,15	1,13	1,11	1,09	0,93	0,88	0,83
150	1,16	1,13	1,11	1,09	0,93	0,88	0,83
185	1,16	1,14	1,11	1,09	0,93	0,87	0,83
240	1,16	1,14	1,12	1,10	0,93	0,87	0,82
300	1,17	1,14	1,12	1,10	0,93	0,87	0,82
400	1,17	1,14	1,12	1,10	0,92	0,86	0,81

Figura B.12: Factores de corrección para resistividades del suelo distintas de 1,5 K·m/W para cables multiconductores en medios subterráneos según IEC 60502-2 [25].

Table B.18 – Correction factors for groups of three-core cables in horizontal formation laid direct in the ground

Number of cables in group	Spacing between cable centres mm				
	Touching	200	400	600	800
2	0,80	0,86	0,90	0,92	0,94
3	0,69	0,77	0,82	0,86	0,89
4	0,62	0,72	0,79	0,83	0,87
5	0,57	0,68	0,76	0,81	0,85
6	0,54	0,65	0,74	0,80	0,84
7	0,51	0,63	0,72	0,78	0,83
8	0,49	0,61	0,71	0,78	
9	0,47	0,60	0,70	0,77	–
10	0,46	0,59	0,69	–	–
11	0,45	0,57	0,69	–	–
12	0,43	0,56	0,68	–	–

Table B.19 – Correction factors for groups of three-phase circuits of single-core cables laid direct in the ground

Number of cables in group	Spacing between group centres mm				
	Touching	200	400	600	800
2	0,73	0,83	0,88	0,90	0,92
3	0,60	0,73	0,79	0,83	0,86
4	0,54	0,68	0,75	0,80	0,84
5	0,49	0,63	0,72	0,78	0,82
6	0,46	0,61	0,70	0,76	0,81
7	0,43	0,58	0,68	0,75	0,80
8	0,41	0,57	0,67	0,74	–
9	0,39	0,55	0,66	0,73	–
10	0,37	0,54	0,65	–	–
11	0,36	0,53	0,64	–	–
12	0,35	0,52	0,64	–	–

Figura B.13: Factores de corrección para grupos de cables enterrados horizontalmente entre sí según IEC 60502-2 [25].

Table B.20 – Correction factors for groups of three-core cables in single way ducts in horizontal formation

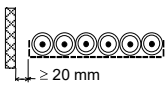
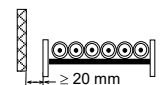
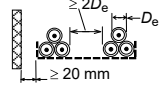
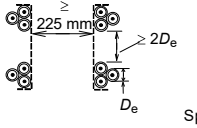
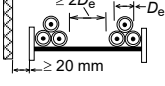
Number of cables in group	Spacing between duct centres mm				
	Touching	200	400	600	800
2	0,85	0,88	0,92	0,94	0,95
3	0,75	0,80	0,85	0,88	0,91
4	0,69	0,75	0,82	0,86	0,89
5	0,65	0,72	0,79	0,84	0,87
6	0,62	0,69	0,77	0,83	0,87
7	0,59	0,67	0,76	0,82	0,86
8	0,57	0,65	0,75	0,81	–
9	0,55	0,64	0,74	0,80	–
10	0,54	0,63	0,73	–	–
11	0,52	0,62	0,73	–	–
12	0,51	0,61	0,72	–	–

Table B.21 – Correction factors for groups of three-phase circuits of single-core cables in single-way ducts

Number of cables in group	Spacing between duct group centres mm				
	Touching	200	400	600	800
2	0,78	0,85	0,89	0,91	0,93
3	0,66	0,75	0,81	0,85	0,88
4	0,59	0,70	0,77	0,82	0,86
5	0,55	0,66	0,74	0,80	0,84
6	0,51	0,64	0,72	0,78	0,83
7	0,48	0,61	0,71	0,77	0,82
8	0,46	0,60	0,70	0,76	–
9	0,44	0,58	0,69	0,76	–
10	0,43	0,57	0,68	–	–
11	0,42	0,56	0,67	–	–
12	0,40	0,55	0,67	–	–

Figura B.14: Factores de corrección para grupos de cables en ductos dispuestos horizontalmente entre sí según IEC 60502-2 [25].

Table B.23 – Reduction factors for groups of more than one circuit of single-core cables
(Note 2) – To be applied to the current-carrying capacity for one circuit of single-core cables in free air

Method of installation		Number of trays	Number of three-phase circuits (Note 5)			Use as a multiplier to rating for
			1	2	3	
Perforated trays (Note 3)		1	0,98	0,91	0,87	Three cables in horizontal formation
		2	0,96	0,87	0,81	
		3	0,95	0,85	0,78	
Ladder supports, cleats etc. (Note 3)		1	1,00	0,97	0,96	Three cables in horizontal formation
		2	0,98	0,93	0,89	
		3	0,97	0,90	0,86	
Perforated trays (Note 3)		1	1,00	0,98	0,96	Three cables in trefoil formation
		2	0,97	0,93	0,89	
		3	0,96	0,92	0,86	
Vertical perforated trays (Note 4)		1	1,00	0,91	0,89	
		2	1,00	0,90	0,86	
Ladder supports, cleats, etc. (Note 3)		1	1,00	1,00	1,00	
		2	0,97	0,95	0,93	
		3	0,96	0,94	0,90	

NOTE 1 Values given are averages for the cable types and range of conductor sizes considered. The spread of values is generally less than 5 %.

NOTE 2 Factors are given for single layers of cables (or trefoil groups) as shown in the table and do not apply when cables are installed in more than one layer touching each other. Values for such installations may be significantly lower and should be determined by an appropriate method.

NOTE 3 Values are given for vertical spacings between trays of 300 mm. For closer spacing, the factors should be reduced.

NOTE 4 Values are given for horizontal spacing between trays of 225 mm with trays mounted back to back. For closer spacing, the factors should be reduced.

NOTE 5 For circuits having more than one cable in parallel per phase, each three phase set of conductors should be considered as a circuit for the purpose of this table.

Figura B.15: Factores de corrección para monoconductores en canalizaciones en aire según IEC 60502-2 [25].

**Table B.22 – Reduction factors for groups of more than one multi-core cable in air –
To be applied to the current-carrying capacity for one multi-core cable in free air**

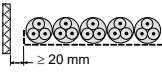
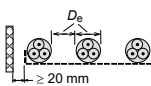
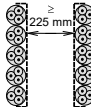
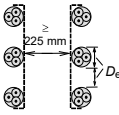
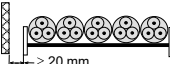
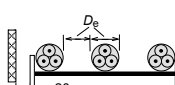
Method of installation		Number of trays	Number of cables					
			1	2	3	4	6	9
Cables on perforated trays	Touching 	1	1,00	0,88	0,82	0,79	0,76	0,73
		2	1,00	0,87	0,80	0,77	0,73	0,68
		3	1,00	0,86	0,79	0,76	0,71	0,66
	Spaced 	1	1,00	1,00	0,98	0,95	0,91	—
		2	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	—
		3	1,00	0,98	0,95	0,91	0,85	—
Cables on vertical perforated trays	Touching 	1	1,00	0,88	0,82	0,78	0,73	0,72
		2	1,00	0,88	0,81	0,76	0,71	0,70
	Spaced 	1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,87	—
		2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,85	—
Cables on ladder supports, cleats, etc.	Touching 	1	1,00	0,87	0,82	0,80	0,79	0,78
		2	1,00	0,86	0,80	0,78	0,76	0,73
		3	1,00	0,85	0,79	0,76	0,73	0,70
	Spaced 	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—
		2	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	—
		3	1,00	0,98	0,97	0,96	0,93	—
NOTE 1 Values given are averages for the cable types and range of conductor sizes considered. The spread of values is generally less than 5 %. NOTE 2 Factors apply to single layer groups of cables as shown above and do not apply when cables are installed in more than one layer touching each other. Values for such installations may be significantly lower and must be determined by an appropriate method. NOTE 3 Values are given for vertical spacings between trays of 300 mm and at least 20 mm between trays and wall. For closer spacing, the factors should be reduced. NOTE 4 Values are given for horizontal spacing between trays of 225 mm with trays mounted back to back. For closer spacing, the factors should be reduced.								

Figura B.16: Factores de corrección para multiconductores en canalizaciones en aire según IEC 60502-2 [25].

B.3. Norma RIC N°4

Tabla N°4.6: Factor de corrección de capacidad de transporte de corriente por cantidad de conductores en ductos

Cantidad de conductores	Factor de corrección f_n
4 a 6	0,8
7 a 24	0,7
25 a 42	0,6
sobre 42	0,5

Figura B.17: Factor de corrección de capacidad de transporte de corriente por cantidad de conductores en ductos según RIC N°4 [8].

Tabla N°4.7: Factores de corrección de capacidad de transporte de corriente f_t por variación de temperatura ambiente

Temperatura ambiente [°C]	Temperatura de servicio 70°C Cables tipo H07V, H07Z1, THWN, NYIFY, ACOMETIDA, H03VV, H05VV, H05RR, H05RN, H07RN, SPT.	TEMPERATURA DE SERVICIO 90°C Cables tipo RV, RV-K, RZ1, RZ1-K, THHN.	
	Métodos de instalación A1, B1, E	Métodos de instalación A1, A2, B1, B2, E	Método de instalación D1 y D2*
5-10	1,22	1,15	1,07
11-15	1,17	1,12	1,04
16-20	1,12	1,08	1,00
21-25	1,06	1,04	0,96
26-30	1,00	1,00	0,93
31-35	0,94	0,96	0,89
36-40	0,87	0,91	0,85
41-45	0,79	0,87	0,80
46-50	0,71	0,82	0,76
51-55	0,61	0,76	0,71
56-60	0,50	0,71	0,65

Figura B.18: Factores de corrección para ampacidad por variación de temperatura ambiente para conductores según RIC N°4 [8].

B.4. Norma NFPA-70

Table 310.15(B)(2)(a) Ambient Temperature Correction Factors Based on 30°C (86°F)

For ambient temperatures other than 30°C (86°F), multiply the allowable ampacities specified in the ampacity tables by the appropriate correction factor shown below.				
Ambient Temperature (°C)	Temperature Rating of Conductor			Ambient Temperature (°F)
	60°C	75°C	90°C	
10 or less	1.29	1.20	1.15	50 or less
11–15	1.22	1.15	1.12	51–59
16–20	1.15	1.11	1.08	60–68
21–25	1.08	1.05	1.04	69–77
26–30	1.00	1.00	1.00	78–86
31–35	0.91	0.94	0.96	87–95
36–40	0.82	0.88	0.91	96–104
41–45	0.71	0.82	0.87	105–113
46–50	0.58	0.75	0.82	114–122
51–55	0.41	0.67	0.76	123–131
56–60	—	0.58	0.71	132–140
61–65	—	0.47	0.65	141–149
66–70	—	0.33	0.58	150–158
71–75	—	—	0.50	159–167
76–80	—	—	0.41	168–176
81–85	—	—	0.29	177–185

Figura B.19: Factores de corrección para temperatura ambiente distinta de 30°C según NFPA-70 [11].

Table 310.15(B)(3)(a) Adjustment Factors for More Than Three Current-Carrying Conductors

Number of Conductors ¹	Percent of Values in Table 310.15(B)(16) Through Table 310.15(B)(19) as Adjusted for Ambient Temperature if Necessary
4–6	80
7–9	70
10–20	50
21–30	45
31–40	40
41 and above	35

¹Number of conductors is the total number of conductors in the raceway or cable, including spare conductors. The count shall be adjusted in accordance with 310.15(B)(5) and (6). The count shall not include conductors that are connected to electrical components that cannot be simultaneously energized.

Figura B.20: Factores de corrección por agrupamiento para más de 3 conductores conduciendo corriente en una misma canalización [11].

B.5. Norma IEEE-399

Table 13-8— F_g : Grouping adjustment factor for 0–5000 V 3/C, or triplexed cables in duct banks (no spare ducts, nonmetallic conduits of 5 in with center-to-center spacing of 7.5 in)

Cable size	No. of rows	Number of columns														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
#8	1	1.00	.942	.885	.835	.795	.768	.745	.727	.710	.698	.688	.679	.671	.664	.658
	2	.930	.840	.772	.723	.687	.660	.638	.620	.604	.592	.582	.572	.564	.557	.550
	3	.870	.772	.694	.632	.596	.569	.548	.532	.519	.508	.498	.490	.482	.476	.470
	4	.820	.710	.629	.571	.536	.509	.490	.472	.458	.446	.436	.428	.420	.412	.405
#6	1	1.00	.930	.874	.826	.790	.760	.737	.718	.702	.690	.680	.671	.663	.656	.650
	2	.920	.813	.747	.700	.665	.638	.615	.598	.583	.572	.561	.552	.544	.537	.530
	3	.860	.747	.679	.625	.588	.560	.540	.525	.510	.498	.490	.481	.473	.467	.460
	4	.810	.700	.620	.565	.531	.503	.484	.467	.452	.440	.431	.422	.415	.408	.400
#4	1	1.00	.925	.871	.817	.781	.750	.726	.707	.691	.678	.668	.659	.651	.646	.640
	2	.920	.809	.742	.693	.659	.632	.610	.593	.579	.567	.555	.547	.539	.530	.525
	3	.850	.742	.668	.615	.578	.551	.531	.514	.500	.489	.480	.471	.464	.458	.450
	4	.805	.690	.610	.560	.524	.497	.477	.460	.447	.435	.425	.418	.410	.401	.395
#2	1	1.00	.918	.858	.808	.770	.741	.720	.701	.688	.677	.667	.658	.650	.641	.635
	2	.920	.800	.723	.680	.648	.623	.602	.586	.572	.560	.549	.540	.530	.522	.514
	3	.840	.723	.657	.608	.568	.540	.520	.504	.490	.479	.470	.461	.454	.447	.440
	4	.800	.685	.608	.553	.518	.490	.471	.453	.440	.429	.420	.411	.402	.395	.390
#1	1	1.00	.918	.849	.799	.753	.721	.699	.682	.669	.659	.650	.643	.639	.632	.630
	2	.920	.795	.702	.650	.613	.583	.563	.546	.530	.520	.510	.502	.494	.488	.482
	3	.830	.702	.618	.562	.525	.500	.480	.464	.450	.440	.430	.421	.413	.406	.400
	4	.740	.634	.551	.497	.465	.440	.421	.405	.392	.383	.374	.366	.359	.352	.348
1/0	1	1.00	.910	.842	.791	.745	.716	.694	.678	.665	.655	.646	.639	.635	.628	.626
	2	.915	.790	.700	.642	.604	.575	.555	.537	.523	.511	.503	.494	.486	.480	.475
	3	.817	.700	.610	.554	.520	.494	.474	.457	.444	.432	.424	.415	.408	.400	.394
	4	.735	.629	.546	.492	.460	.435	.417	.402	.391	.381	.371	.363	.355	.349	.343
2/0	1	1.00	.910	.842	.791	.745	.716	.694	.678	.665	.655	.646	.639	.635	.628	.626
	2	.915	.790	.700	.642	.604	.575	.555	.537	.523	.511	.503	.494	.486	.480	.475
	3	.817	.700	.610	.554	.520	.494	.474	.457	.444	.432	.424	.415	.408	.400	.394
	4	.735	.629	.546	.492	.460	.435	.417	.402	.391	.381	.371	.363	.355	.349	.343
3/0	1	1.00	.910	.842	.791	.745	.716	.694	.678	.665	.655	.646	.639	.635	.628	.626
	2	.915	.790	.700	.642	.604	.575	.555	.537	.523	.511	.503	.494	.486	.480	.475
	3	.817	.700	.610	.554	.520	.494	.474	.457	.444	.432	.424	.415	.408	.400	.394
	4	.735	.629	.546	.492	.460	.435	.417	.402	.391	.381	.371	.363	.355	.349	.343
4/0	1	1.00	.908	.830	.780	.737	.709	.690	.673	.660	.650	.642	.635	.628	.623	.619
	2	.910	.770	.684	.635	.599	.570	.550	.532	.518	.506	.498	.489	.481	.475	.470
	3	.810	.684	.602	.548	.515	.489	.469	.452	.440	.429	.420	.411	.403	.397	.391
	4	.730	.624	.541	.487	.456	.431	.414	.399	.388	.378	.368	.360	.352	.346	.341
250	1	1.00	.905	.830	.777	.725	.692	.668	.646	.628	.615	.603	.597	.590	.583	.580
	2	.890	.770	.675	.609	.570	.542	.519	.500	.485	.474	.466	.458	.450	.445	.440
	3	.780	.675	.579	.518	.480	.454	.434	.420	.408	.398	.390	.383	.378	.373	.370
	4	.694	.588	.512	.460	.422	.397	.379	.364	.352	.345	.338	.331	.327	.323	.320

Figura B.21: Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 0 - 5000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19].

Table 13-8— F_g : Grouping adjustment factor for 0–5000 V 3/C, or triplexed cables in duct banks (no spare ducts, nonmetallic conduits of 5 in with center-to-center spacing of 7.5 in) (Continued)

Cable size	No. of rows	Number of columns														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
350	1	1.00	.905	.830	.770	.720	.688	.661	.640	.622	.608	.597	.590	.583	.578	.573
	2	.887	.749	.664	.609	.570	.540	.518	.499	.484	.474	.465	.458	.450	.445	.440
	3	.775	.664	.575	.515	.479	.453	.433	.419	.406	.397	.389	.382	.377	.372	.369
	4	.690	.587	.511	.457	.421	.395	.377	.362	.351	.343	.336	.330	.325	.321	.318
500	1	1.00	.897	.815	.762	.708	.678	.652	.630	.613	.599	.588	.581	.575	.570	.565
	2	.882	.745	.656	.608	.569	.539	.516	.498	.483	.473	.463	.457	.450	.444	.439
	3	.770	.656	.570	.514	.478	.452	.432	.417	.404	.395	.388	.381	.375	.370	.367
	4	.685	.585	.510	.454	.420	.393	.374	.360	.349	.340	.333	.328	.323	.319	.315
750	1	1.00	.890	.802	.747	.700	.670	.640	.622	.605	.590	.580	.572	.566	.560	.555
	2	.870	.725	.641	.591	.552	.522	.500	.484	.469	.457	.448	.440	.434	.430	.425
	3	.760	.641	.560	.507	.470	.445	.425	.410	.398	.389	.380	.374	.369	.363	.360
	4	.680	.579	.501	.448	.413	.389	.371	.357	.346	.337	.330	.323	.318	.314	.310
1000	1	1.00	.885	.795	.740	.695	.665	.639	.618	.600	.585	.574	.567	.561	.555	.551
	2	.858	.716	.632	.582	.544	.513	.493	.474	.460	.448	.439	.431	.425	.420	.415
	3	.748	.632	.551	.499	.464	.439	.419	.403	.392	.383	.375	.369	.363	.358	.355
	4	.676	.574	.497	.444	.409	.385	.367	.353	.342	.333	.326	.319	.315	.311	.308

Figura B.22: Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 0 - 5000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19] (continuación).

Table 13-9— F_g : Grouping adjustment factor for 5001–35 000 V 3/C, or triplexed cables in duct banks (no spare ducts, nonmetallic conduits of 5 in with center-to-center spacing of 7.5 in)

Cable size	No. of rows	Number of columns														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
#6	1	1.00	.920	.854	.803	.758	.726	.699	.678	.660	.646	.635	.628	.620	.615	.610
	2	.920	.800	.714	.660	.620	.590	.570	.552	.540	.530	.521	.515	.509	.503	.500
	3	.840	.714	.625	.569	.530	.501	.484	.470	.459	.450	.442	.436	.429	.423	.420
	4	.770	.642	.560	.506	.469	.441	.422	.406	.394	.385	.378	.371	.367	.362	.358
#4	1	1.00	.920	.852	.800	.755	.722	.695	.673	.655	.642	.630	.623	.615	.610	.605
	2	.920	.795	.714	.660	.620	.590	.570	.552	.540	.530	.521	.515	.509	.503	.500
	3	.835	.709	.615	.561	.521	.493	.474	.459	.448	.439	.430	.424	.420	.416	.412
	4	.760	.630	.548	.498	.460	.430	.410	.395	.382	.374	.367	.361	.356	.352	.350
#2	1	1.00	.910	.836	.784	.748	.714	.688	.665	.649	.635	.625	.616	.609	.602	.598
	2	.920	.782	.689	.639	.599	.570	.548	.531	.518	.508	.500	.494	.489	.484	.480
	3	.820	.689	.600	.544	.505	.479	.460	.445	.433	.424	.417	.410	.405	.400	.395
	4	.746	.622	.539	.484	.445	.415	.396	.382	.370	.361	.353	.348	.342	.338	.334
#1	1	1.00	.905	.827	.777	.731	.697	.670	.645	.626	.610	.598	.588	.579	.571	.565
	2	.920	.771	.681	.629	.590	.560	.538	.519	.502	.491	.480	.471	.462	.455	.450
	3	.816	.681	.588	.532	.497	.469	.448	.432	.418	.407	.397	.389	.382	.376	.370
	4	.785	.605	.524	.471	.435	.410	.390	.376	.364	.353	.347	.340	.333	.328	.323
1/0	1	1.00	.904	.825	.775	.729	.695	.668	.643	.624	.609	.597	.587	.578	.570	.564
	2	.912	.765	.671	.619	.580	.549	.527	.509	.494	.481	.471	.462	.453	.446	.440
	3	.811	.671	.581	.525	.488	.460	.440	.423	.409	.398	.387	.379	.372	.365	.359
	4	.730	.604	.518	.464	.431	.406	.385	.372	.359	.349	.341	.335	.329	.324	.320

Figura B.23: Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 5001 - 35000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19].

Table 13-9— F_g : Grouping adjustment factor for 5001–35 000 V 3/C, or triplexed cables in duct banks (no spare ducts, nonmetallic conduits of 5 in with center-to-center spacing of 7.5 in) (Continued)

Cable size	No. of rows	Number of columns														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2/0	1	1.00	.904	.823	.773	.728	.694	.668	.643	.624	.609	.580	.597	.587	.578	.570
	2	.903	.761	.667	.612	.573	.542	.520	.500	.488	.475	.463	.455	.448	.441	.434
	3	.800	.667	.578	.520	.482	.454	.433	.418	.402	.391	.382	.374	.367	.360	.353
	4	.722	.597	.511	.460	.425	.400	.380	.365	.353	.343	.335	.329	.322	.317	.312
3/0	1	1.00	.898	.814	.765	.722	.690	.661	.637	.618	.602	.590	.580	.571	.563	.556
	2	.898	.752	.664	.609	.570	.539	.511	.498	.483	.471	.461	.451	.443	.437	.429
	3	.802	.664	.572	.514	.479	.451	.430	.414	.399	.388	.379	.371	.364	.357	.350
	4	.720	.593	.508	.456	.421	.396	.377	.362	.350	.340	.332	.327	.320	.314	.310
4/0	1	1.00	.894	.811	.762	.717	.682	.653	.631	.612	.597	.585	.574	.566	.558	.550
	2	.896	.743	.656	.603	.565	.536	.513	.496	.480	.468	.459	.449	.441	.434	.427
	3	.795	.656	.564	.513	.474	.447	.427	.411	.397	.386	.377	.369	.362	.355	.349
	4	.711	.584	.502	.450	.417	.392	.374	.359	.348	.338	.329	.324	.317	.311	.307
250	1	1.00	.892	.811	.762	.715	.679	.645	.620	.600	.583	.572	.564	.557	.552	.550
	2	.885	.741	.654	.594	.552	.523	.500	.482	.469	.457	.447	.438	.430	.422	.416
	3	.785	.654	.559	.498	.459	.429	.408	.388	.373	.361	.351	.342	.335	.328	.321
	4	.701	.580	.500	.448	.414	.385	.365	.348	.332	.321	.311	.302	.295	.288	.281
350	1	1.00	.890	.807	.754	.700	.661	.634	.609	.589	.572	.561	.552	.548	.542	.540
	2	.872	.733	.641	.580	.538	.510	.488	.470	.455	.443	.432	.423	.415	.408	.400
	3	.772	.641	.550	.492	.451	.420	.396	.377	.362	.350	.340	.331	.323	.316	.310
	4	.681	.572	.491	.440	.402	.375	.354	.337	.322	.311	.300	.292	.285	.278	.271
500	1	1.00	.885	.801	.745	.692	.650	.620	.593	.573	.559	.548	.539	.533	.529	.526
	2	.862	.728	.634	.572	.531	.502	.480	.462	.447	.435	.425	.415	.407	.400	.391
	3	.765	.634	.542	.483	.446	.415	.391	.373	.358	.346	.335	.327	.319	.311	.305
	4	.676	.574	.497	.444	.409	.385	.367	.353	.342	.333	.326	.319	.315	.311	.308
750	1	1.00	.879	.790	.780	.682	.647	.615	.589	.570	.556	.545	.536	.530	.524	.520
	2	.850	.710	.622	.560	.520	.490	.469	.450	.436	.424	.412	.402	.394	.388	.381
	3	.755	.622	.530	.479	.441	.410	.387	.368	.352	.341	.331	.322	.314	.307	.300
	4	.671	.560	.480	.430	.392	.366	.345	.328	.314	.302	.292	.284	.277	.270	.263
1000	1	1.00	.873	.786	.730	.680	.642	.609	.582	.562	.548	.537	.528	.521	.516	.512
	2	.844	.705	.614	.554	.514	.485	.463	.445	.430	.418	.406	.397	.390	.383	.376
	3	.745	.614	.523	.472	.434	.403	.381	.363	.348	.337	.327	.318	.309	.301	.294
	4	.663	.552	.473	.422	.385	.359	.338	.321	.307	.295	.285	.278	.270	.263	.256

Figura B.24: Factor de corrección por agrupamiento para conductores entre 5001 - 35000 V en bancos de ductos de hasta 4x15 según IEEE-399 [19] (continuación).

Anexo C

Parámetros eléctricos de proveedores

A continuación se presentan los parámetros eléctricos de los proveedores más típicos utilizados para el modulo de caída de tensión:

Nominal sectional area mm²	Maximum DC Resist- ance of Cdr. at 20°C Ω / km	Minimum insulation resistance at 20°C MΩ-km	AC Resistance at 90°C		Inductance		Zero Sequence Impedance				Voltage Drop PF = 0.8		Ampacities direct burial at 25°C ground temp. A RHO 120 Depth 1 m A		Ampacities in free air at 40°C ambient A	
			Ω / km		mH/km		Ω / km		Ro	Xo	Ro	Xo	V/A/km		Flat	Trefoil
			Flat	Trefoil	Flat	Trefoil	Flat	Trefoil					Flat	Trefoil		
1.5	12.1	1,021	15.43	15.43	0.450	0.519	15.577	2.415	15.577	2.362	24.856	24.882	33	32	27	23
2.5	7.41	842	9.45	9.45	0.414	0.484	9.597	2.384	9.597	2.332	15.274	15.300	43	42	36	31
4	4.61	698	5.88	5.88	0.383	0.453	6.027	2.353	6.027	2.301	9.550	9.576	56	54	47	40
6	3.08	591	3.93	3.93	0.359	0.428	4.076	2.326	4.076	2.273	6.419	6.445	70	67	60	51
10	1.83	511	2.33	2.33	0.340	0.410	2.482	2.301	2.482	2.249	3.862	3.888	91	88	81	69
16	1.15	419	1.47	1.47	0.317	0.387	1.615	2.267	1.615	2.214	2.466	2.492	117	113	108	92
25	0.727	426	0.927	0.927	0.304	0.374	1.076	2.224	1.076	2.171	1.598	1.624	150	144	146	124
35	0.524	369	0.668	0.668	0.291	0.360	0.817	2.197	0.817	2.144	1.179	1.205	180	172	180	153
50	0.387	351	0.494	0.494	0.281	0.351	0.643	2.167	0.643	2.114	0.896	0.922	213	204	220	187
70	0.268	327	0.342	0.342	0.272	0.341	0.491	2.135	0.491	2.082	0.650	0.676	259	248	279	237
95	0.193	282	0.247	0.247	0.264	0.333	0.396	2.104	0.396	2.052	0.495	0.521	310	296	347	294
120	0.153	275	0.196	0.196	0.259	0.329	0.345	2.081	0.345	2.029	0.412	0.437	352	336	405	343
150	0.124	287	0.160	0.159	0.259	0.329	0.309	2.057	0.308	2.005	0.353	0.379	394	376	469	397
185	0.0991	293	0.128	0.128	0.256	0.326	0.277	2.034	0.276	1.981	0.302	0.327	443	424	544	461
240	0.0754	272	0.099	0.098	0.252	0.321	0.248	2.005	0.247	1.953	0.253	0.278	512	489	655	552
300	0.0601	260	0.080	0.079	0.249	0.319	0.229	1.983	0.228	1.931	0.222	0.246	576	549	760	638
400	0.0470	256	0.064	0.063	0.247	0.316	0.213	1.956	0.212	1.904	0.196	0.220	649	620	890	744
500	0.0366	248	0.052	0.050	0.244	0.314	0.201	1.929	0.199	1.877	0.176	0.199	730	697	1046	866
630	0.0283	237	0.043	0.041	0.242	0.312	0.192	1.900	0.189	1.848	0.160	0.182	818	779	1233	1007

Figura C.1: Parámetros eléctricos para el cálculo de la caída de tensión en calibres de cables monoconductores para baja tensión según catalogo de Phelps Dodge [45].

Anexo C. Parámetros eléctricos de proveedores

Nominal sectional area	Maximum DC Resistance of Cdr. at 20°C	Minimum insulation resistance at 20 °C	AC Resistance at 90°C	Inductance mH/km	Positive - Negative Sequence Impedance		Zero Sequence Impedance		Voltage Drop PF = 0.8 V/A/km	Ampacities direct burial at 25 °C ground temp. A "RHO 120 1 m. depth"	Ampacities in free air at 40°C ambient
mm ²	Ω/km	MΩ - km	Ω/km 3 Phase		R	X	Ro	Xo	3 Phase		A
1.5	12.1	1,021	15.43	0.317	15.429	0.100	15.577	2.516	21.482	29	22
2.5	7.41	842	9.45	0.294	9.449	0.092	9.597	2.475	13.188	38	30
4	4.61	698	5.88	0.276	5.878	0.087	6.027	2.435	8.235	50	39
6	3.08	591	3.93	0.263	3.927	0.083	4.076	2.399	5.528	62	50
10	1.83	511	2.33	0.253	2.334	0.079	2.482	2.368	3.316	82	67
16	1.15	419	1.47	0.241	1.467	0.076	1.615	2.324	2.111	105	89
25	0.727	426	0.927	0.242	0.927	0.076	1.076	2.271	1.364	136	120
35	0.524	369	0.669	0.235	0.669	0.074	0.817	2.239	1.003	163	147
50	0.387	351	0.494	0.233	0.494	0.073	0.643	2.204	0.761	193	179
70	0.268	327	0.343	0.230	0.343	0.072	0.491	2.167	0.550	234	224
95	0.193	282	0.247	0.224	0.247	0.070	0.396	2.135	0.416	280	277
120	0.153	275	0.197	0.223	0.197	0.070	0.346	2.109	0.346	319	323
150	0.124	287	0.160	0.225	0.160	0.071	0.309	2.084	0.295	356	368
185	0.0991	293	0.129	0.225	0.129	0.071	0.278	2.058	0.252	402	427
240	0.0754	272	0.100	0.223	0.100	0.070	0.248	2.028	0.211	463	504
300	0.0601	260	0.081	0.221	0.081	0.070	0.230	2.005	0.185	520	578
400	0.0470	256	0.065	0.221	0.066	0.069	0.214	1.976	0.163	589	672

Figura C.2: Parámetros eléctricos para el cálculo de la caída de tensión en calibres de cables multiconductores para baja tensión según catalogo de Phelps Dodge [45].

TABLA VII. Reactancia inductiva la frecuencia de 50 Hz.

Sección nominal (mm ²)	Reactancia inductiva X en Ω/km por fase						
	Tensión asignada del cable						
	1,8/3 kV	3,6/6 kV	6/10 kV	8,7/15 kV	12/20 kV	15/25 kV	18/30 kV
Tres cables unipolares en contacto mutuo							
10	0,136	0,141	-	-	-	-	-
16	0,126	0,130	0,143	-	-	-	-
25	0,117	0,121	0,134	0,141	-	-	-
35	0,111	0,115	0,128	0,135	0,146	-	-
50	0,106	0,109	0,122	0,128	0,138	0,144	0,149
70	0,100	0,103	0,115	0,120	0,130	0,136	0,141
95	0,095	0,098	0,110	0,115	0,125	0,129	0,134
120	0,092	0,095	0,106	0,111	0,120	0,123	0,127
150	0,090	0,092	0,102	0,108	0,117	0,120	0,126
185	0,088	0,091	0,100	0,104	0,112	0,118	0,120
240	0,085	0,088	0,097	0,101	0,108	0,116	0,116
300	0,083	0,087	0,093	0,097	0,104	0,108	0,111
400	0,081	0,085	0,091	0,095	0,101	0,104	0,108
500	0,080	0,084	0,089	0,092	0,099	0,100	0,105
Un cable tripolar							
10	0,115	0,122	-	-	-	-	-
16	0,107	0,113	0,127	-	-	-	-
25	0,100	0,105	0,118	0,127	-	-	-
35	0,095	0,100	0,112	0,120	0,126	-	-
50	0,091	0,095	0,106	0,114	0,120	0,127	0,133
70	0,086	0,090	0,100	0,107	0,113	0,119	0,125
95	0,083	0,087	0,096	0,102	0,107	0,114	0,119
120	0,081	0,084	0,093	0,098	0,103	0,109	0,114
150	0,079	0,082	0,090	0,096	0,101	0,106	0,111
185	0,079	0,081	0,089	0,094	0,098	0,103	0,108
240	0,076	0,079	0,085	0,090	0,094	0,099	0,103

Figura C.3: Valores de reactancia inductiva para conductores en media tensión según catalogo de Prysmian Cables [46].

Anexo C. Parámetros eléctricos de proveedores

Table 9 Alternating-Current Resistance and Reactance for 600-Volt Cables, 3-Phase, 60 Hz, 75°C (167°F) — Three Single Conductors in Conduit

Size (AWG or kcmil)	Ohms to Neutral per Kilometer Ohms to Neutral per 1000 Feet															Size (AWG or kcmil)
	X_L (Reactance) for All Wires			Alternating-Current Resistance for Uncoated Copper Wires			Alternating-Current Resistance for Aluminum Wires			Effective Z at 0.85 PF for Uncoated Copper Wires			Effective Z at 0.85 PF for Aluminum Wires			
	PVC, Aluminum Conduits	Steel Conduit	PVC Conduit	Aluminum Conduit	Steel Conduit	PVC Conduit	Aluminum Conduit	Steel Conduit	PVC Conduit	Aluminum Conduit	Steel Conduit	PVC Conduit	Aluminum Conduit	Steel Conduit		
14	0.190 0.058	0.240 0.073	10.2 3.1	10.2 3.1	10.2 3.1	— —	— —	— —	8.9 2.7	8.9 2.7	8.9 2.7	— —	— —	— —	14	
12	0.177 0.054	0.223 0.068	6.6 2.0	6.6 2.0	6.6 2.0	10.5 3.2	10.5 3.2	10.5 3.2	5.6 1.7	5.6 1.7	5.6 1.7	9.2 2.8	9.2 2.8	9.2 2.8	12	
10	0.164 0.050	0.207 0.063	3.9 1.2	3.9 1.2	3.9 1.2	6.6 2.0	6.6 2.0	6.6 2.0	3.6 1.1	3.6 1.1	3.6 1.1	5.9 1.8	5.9 1.8	5.9 1.8	10	
8	0.171 0.052	0.213 0.065	2.56 0.78	2.56 0.78	2.56 0.78	4.3 1.3	4.3 1.3	4.3 1.3	2.26 0.69	2.26 0.69	2.30 0.70	3.6 1.1	3.6 1.1	3.6 1.1	8	
6	0.167 0.051	0.210 0.064	1.61 0.49	1.61 0.49	1.61 0.49	2.66 0.81	2.66 0.81	2.66 0.81	1.44 0.44	1.48 0.45	1.48 0.45	2.33 0.71	2.36 0.72	2.36 0.72	6	
4	0.157 0.048	0.197 0.060	1.02 0.31	1.02 0.31	1.02 0.31	1.67 0.51	1.67 0.51	1.67 0.51	0.95 0.29	0.95 0.29	0.98 0.30	1.51 0.46	1.51 0.46	1.51 0.46	4	
3	0.154 0.047	0.194 0.059	0.82 0.25	0.82 0.25	0.82 0.25	1.31 0.40	1.35 0.41	1.31 0.40	0.75 0.23	0.79 0.24	0.79 0.24	1.21 0.37	1.21 0.37	1.21 0.37	3	
2	0.148 0.045	0.187 0.057	0.62 0.19	0.66 0.20	0.66 0.20	1.05 0.32	1.05 0.32	1.05 0.32	0.62 0.19	0.62 0.19	0.66 0.20	0.98 0.30	0.98 0.30	0.98 0.30	2	
1	0.151 0.046	0.187 0.057	0.49 0.15	0.52 0.16	0.52 0.16	0.82 0.25	0.85 0.26	0.82 0.25	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	0.79 0.24	0.79 0.24	0.82 0.25	1	
1/0	0.144 0.044	0.180 0.055	0.39 0.12	0.43 0.13	0.39 0.12	0.66 0.20	0.69 0.21	0.66 0.20	0.43 0.13	0.43 0.13	0.43 0.13	0.62 0.19	0.66 0.20	0.66 0.20	1/0	
2/0	0.141 0.043	0.177 0.054	0.33 0.10	0.33 0.10	0.33 0.10	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	0.36 0.11	0.36 0.11	0.36 0.11	0.52 0.16	0.52 0.16	0.52 0.16	2/0	
3/0	0.138 0.042	0.171 0.052	0.253 0.077	0.269 0.082	0.259 0.079	0.43 0.13	0.43 0.13	0.43 0.13	0.289 0.088	0.302 0.092	0.308 0.094	0.43 0.13	0.43 0.13	0.46 0.14	3/0	
4/0	0.135 0.041	0.167 0.051	0.203 0.062	0.220 0.067	0.207 0.063	0.33 0.10	0.36 0.11	0.33 0.10	0.243 0.074	0.256 0.078	0.262 0.080	0.36 0.11	0.36 0.11	0.36 0.11	4/0	
250	0.135 0.041	0.171 0.052	0.171 0.052	0.187 0.057	0.177 0.054	0.279 0.085	0.295 0.090	0.282 0.086	0.217 0.066	0.230 0.070	0.240 0.073	0.308 0.094	0.322 0.098	0.33 0.10	250	
300	0.135 0.041	0.167 0.051	0.144 0.044	0.161 0.049	0.148 0.045	0.233 0.071	0.249 0.076	0.236 0.072	0.194 0.059	0.207 0.063	0.213 0.065	0.269 0.082	0.282 0.086	0.289 0.088	300	
350	0.131 0.040	0.164 0.050	0.125 0.038	0.141 0.043	0.128 0.039	0.200 0.061	0.217 0.066	0.207 0.063	0.174 0.053	0.190 0.058	0.197 0.060	0.240 0.073	0.253 0.077	0.262 0.080	350	
400	0.131 0.040	0.161 0.049	0.108 0.033	0.125 0.038	0.115 0.035	0.177 0.054	0.194 0.059	0.180 0.055	0.161 0.049	0.174 0.053	0.184 0.056	0.217 0.066	0.233 0.071	0.240 0.073	400	
500	0.128 0.039	0.157 0.048	0.089 0.027	0.105 0.032	0.095 0.029	0.141 0.043	0.157 0.048	0.148 0.045	0.141 0.043	0.157 0.048	0.164 0.050	0.187 0.057	0.200 0.061	0.210 0.064	500	
600	0.128 0.039	0.157 0.048	0.075 0.023	0.092 0.028	0.082 0.025	0.118 0.036	0.135 0.041	0.125 0.038	0.131 0.040	0.144 0.044	0.154 0.047	0.167 0.051	0.180 0.055	0.190 0.058	600	
750	0.125 0.038	0.157 0.048	0.062 0.019	0.079 0.024	0.069 0.021	0.095 0.029	0.112 0.034	0.102 0.031	0.118 0.036	0.131 0.040	0.141 0.043	0.148 0.045	0.161 0.049	0.171 0.052	750	
1000	0.121 0.037	0.151 0.046	0.049 0.015	0.062 0.019	0.059 0.018	0.075 0.023	0.089 0.027	0.082 0.025	0.105 0.032	0.118 0.036	0.131 0.040	0.128 0.039	0.138 0.042	0.151 0.046	1000	

Figura C.4: Valores para la resistencia y reactancia de conductores trifásicos de acuerdo a NFPA-70 [11].

Anexo D

Propiedades para el aire

Temperatura °C	Conductividad Térmica $W/m \cdot K$	Calor específico $kJ/kg \cdot K$	Número de Prandtl [-]	Densidad kg/m^3	Viscosidad dinámica $\mu, N \cdot s/m^2$
-73.15	0.0181	1.007	0.737	1.7458	0.00001325
-23.15	0.0223	1.006	0.72	1.3947	0.00001596
26.85	0.0263	1.007	0.707	1.1614	0.00001846
76.85	0.03	1.009	0.7	0.995	0.00002082
126.85	0.0338	1.014	0.69	0.8711	0.00002301
176.85	0.0373	1.021	0.686	0.774	0.00002507
226.85	0.0407	1.03	0.684	0.6964	0.00002701
276.85	0.0439	1.04	0.683	0.6329	0.00002884
326.85	0.0469	1.051	0.685	0.5804	0.00003058
376.85	0.0497	1.063	0.69	0.5356	0.00003225
426.85	0.0524	1.075	0.695	0.4975	0.00003388
476.85	0.0549	1.087	0.702	0.4643	0.00003546
526.85	0.0573	1.099	0.709	0.4354	0.00003698
576.85	0.0596	1.11	0.716	0.4097	0.00003843
626.85	0.062	1.121	0.72	0.3868	0.00003981
676.85	0.0643	1.131	0.723	0.3666	0.00004113
726.85	0.0667	1.141	0.726	0.3482	0.00004244

Tabla D.1: Propiedades termo-físicas del aire a presión atmosférica. Adaptado de [47]

Anexo E

Planillas corporativas usadas

E.1. Planilla de entrada

ITEM	TRAMO		DATOS								DATOS CANALIZACIÓN		TENSIÓN	CORTOCIRCUITO		
N°	ORIGEN	DESTINO	TIPO CARGA MOTOR / LOAD	DRIVE / PARTIDOR	POTENCIA	UNID (kVA / kW)	POTENCIA STD.	F.P.	EFF	IP/IN	LARGO m	CONFIG.	V	APLICA?	Icc [kA]	TIEMPO DE ACLARAMIENTO [s]
1	224600-SEE-001	224400-SEU-001	LOAD	VSD	1500	kVA	1500	0.89	0.96	1.3	1000	LADDER	13800	SI	0.8	0.5
2	224600-SEE-001	224400-SEL-001	LOAD	DOL	1500	kVA	1500	0.89	0.96	1.3	1500	LADDER	13800	SI	0.8	0.5
3	224600-SEE-001	224400-SEL-002	LOAD	FEEDER	1500	kVA	1500	0.89	0.96	1.3	1500	LADDER	13800	SI	0.8	0.5
4	224600-SEE-001	224400-SEL-003	LOAD	FEEDER	1500	kVA	1500	0.89	0.96	1.3	1000	LADDER	13800	SI	0.8	0.5

Figura E.1: Ejemplo planilla de entrada de datos para CableFunc.

E.2. Planilla de salida decisión técnica

ITEM	TRAMO		DATOS	In	FACTORES DEBARRATO			SELECCIÓN CABLE POR AMPACIDAD				SELECCIÓN CABLE POR REGULACIÓN DE TENSIÓN				SELECCIÓN CABLE POR PARTIDA DE MOTORES				SELECCIÓN POR CRITERIO CORTOCIRCUITO				CABLE SELECCIONADO				REGULACIÓN CABLE SELECCIONADO		
	N°	ORIGEN	DESTINO		Tipo CARCA MOTOR	A	FT	FC	A	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG G	NSC	TIPO	CALIBRE mm²	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG G	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG G	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG G	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG G	CLASE	A	REG. PERM.
1.0	224600-SEE-001	224400-SEU-001	LOAD	63	0.91	0.78	144.1	1	SINGLE	35	1	SINGLE	35	-	-	-	-	-	1	SINGLE	35	-	-	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	144.1	0.6%	-
2.0	224600-SEE-001	224400-SEL-001	LOAD	63	0.91	0.78	144.1	1	SINGLE	35	1	SINGLE	35	-	-	-	-	-	-	-	-	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	144.1	1.0%	-		
3.0	224600-SEE-001	224400-SEL-002	LOAD	63	0.91	0.78	144.1	1	SINGLE	35	1	SINGLE	35	-	-	-	-	-	-	-	-	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	144.1	1.0%	-		
4.0	224600-SEE-001	224400-SEL-003	LOAD	63	0.91	0.78	144.1	1	SINGLE	35	1	SINGLE	35	-	-	-	-	-	-	-	-	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	144.1	0.6%	-		

Figura E.2: Ejemplo planilla de salida para CableFunc.

E.3. Planilla de salida decisión económica

ITEM	TRAMO		DATOS	In	FACTORES DEBATEO			CABLE SELECCIONADO					CABLE SELECCIONADO SEGUN CRITERIOS ECONOMICOS					¿SUBIR EL CALIBRE?	VALORES ECONOMICOS [USD]							
	Nº	ORIGEN	DESTINO		TIPO CARGA	FT	FC	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG	CLASE	A	NSC	TIPO	CALIBRE mm²/AWG	CLASE	A	Recomendación	ECON. CI TEC [S]	ECON. CI TEC [S]	ECON. CI TEC [S]	ECON. CI ECO [S]	ECON. CI ECO [S]	ECON. CI ECO [S]	ECON. CT ECO [S]	ECON. BENEFICIO [S]
1.0	224600-SEE-001	224400-SEU-001	LOAD	63	0.91	0.78	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	SA4.1	1	SINGLE	50	8.7/15 (17.5) kV	172.2	SI	11011	176525	187536	15536	130375	140908		41628	
2.0	224600-SEE-001	224400-SEL-001	LOAD	63	0.91	0.78	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	SA4.1	1	SINGLE	50	8.7/15 (17.5) kV	172.2	SI	18516	264788	281304	23033	195559	218862		62442	
3.0	224600-SEE-001	224400-SEL-002	LOAD	63	0.91	0.78	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	SA4.1	1	SINGLE	50	8.7/15 (17.5) kV	172.2	SI	18516	264788	281304	23033	195559	218862		62442	
4.0	224600-SEE-001	224400-SEL-003	LOAD	63	0.91	0.78	1	SINGLE	35	8.7/15 (17.5) kV	SA4.1	1	SINGLE	50	8.7/15 (17.5) kV	172.2	SI	11011	176525	187536	15536	130375	140908		41628	

Figura E.3: Ejemplo planilla de salida para EconFunc.

Anexo F

Diseño de la GUI

The screenshot shows the main window of HARS (Hatch Ampacity Rating Software). The window title is "HARS: Hatch Ampacity Rating Software". The interface is orange-themed. At the top, there are menu items: "Opciones", "Lenguaje", "Ayuda/Help", and "About". Below these is the HARS logo and the text "Hatch Ampacity Rating Software".

The main form contains several sections:

- Cliente:** A text field with the value "AMSA Antucoya".
- Revisión:** A text field with the value "P".
- Proyecto:** A text field with the value "xxxx".
- N° / Tag proyecto Hatch:** A text field with the value "H374525".
- Elaborado por:** A text field with the value "Patricio".

Below these fields are several buttons and sections:

- Importación de Datos:** A button labeled "Importar Datos".
- Condiciones del proyecto:** A button labeled "Condiciones del proyecto".
- Selección de cables a usar:** A button labeled "Disponibilidad de Calibres".
- Elección de normativa:** A dropdown menu with the text "Elegir".
- Nombre de las memorias de cálculo de conductores y eficiencia energética:** Two text fields: "Nombre de la memoria de cálculo" and "Nombre del análisis de eficiencia".
- Buttons at the bottom:** "Estimar lista de conductores", "Estimar por Eficiencia Energética", and "Modulo derrateo térmico".

At the bottom left, there is a status bar that says "Bienvenido, versión actual: BETA v1.55".

Figura F.1: Ventana principal de HARS: importación de datos, configuración del proyecto, selección de disponibilidades y ejecución de módulos.

Condiciones del proyecto

Config. AmpacidadConfig. Caída de tensiónConfig. CortocircuitoConfig. Eficiencia energética

Condiciones del entorno:

Temp ambiente:40 °C

Temp suelo:25 °C

Resistividad térmica suelo [K-m/W]1.5

Canalización LADDER:

N° Escalerillas:1

N° Cables por escalerillas:9

Canalización CONDUIT:

N° Cables por Conduit1

Canalización DUCT:

N° Ductos horizontales12

Separacion entre Ductos [m]0.25

Profundidad de enterrado de los ductos [m]0.8

Guardar configuraciónCargar configuraciónAceptar

Condiciones del proyecto

Config. AmpacidadConfig. Caída de tensiónConfig. CortocircuitoConfig. Eficiencia energética

Caída de tensión:

Regulación de tensión:3 %

Regulación durante partida de motor:10 %

Factor de potencia a la partida del motor0,20

Frecuencia [Hz]:50

Guardar configuraciónCargar configuraciónAceptar

(a) Configuraciones de ampacidad normativa (b) Configuraciones de caída de tensión

Figura F.2: Ventanas de configuración para condiciones del proyecto, primera parte.

Condiciones del proyecto

Config. AmpacidadConfig. Caída de tensiónConfig. CortocircuitoConfig. Eficiencia energética

Cortocircuito térmico:

Temperatura de operación del cable [°C]90

Temperatura limite termica del cable [°C]250

Guardar configuraciónCargar configuraciónAceptar

Condiciones del proyecto

Config. AmpacidadConfig. Caída de tensiónConfig. CortocircuitoConfig. Eficiencia energética

Eficiencia energética de cables (CAPEX v/s OPEX):

Años de vida útil estimados20 [Años]

Tasa de descuento anual8 %

Valor del Watt-hora0.26[\$/Wh]

Base de datos para precios de calibres:

	Calibre del conductor [mm2]	Precio de conductor [US\$/m]
1	35.0	13.7797
2	50.0	17.7584
3	70.0	22.8162
4	120.0	31.4094
5	240.0	62.3007

Agregar filaEliminar fila

Guardar configuraciónCargar configuraciónAceptar

(a) Configuraciones para cortocircuito (b) Configuraciones de parámetros económicos

Figura F.3: Ventanas de configuración para condiciones del proyecto, continuación.

Calibres IEC/RIC		Calibres NEC	
IEC - Baja Tensión (≤ 1000 V)		IEC - Media Tensión (> 1000 V)	
4 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	4 mm ²	☐ SINGLE ☐ MULTI
6 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	6 mm ²	☐ SINGLE ☐ MULTI
10 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	10 mm ²	☐ SINGLE ☐ MULTI
16 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	16 mm ²	☐ SINGLE ☐ MULTI
25 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	25 mm ²	☐ SINGLE ☐ MULTI
35 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	35 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
50 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	50 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
70 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	70 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
95 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	95 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
120 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	120 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
150 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	150 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
185 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	185 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
240 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	240 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI
300 mm ²	☐ SINGLE ☒ MULTI	300 mm ²	☒ SINGLE ☒ MULTI

Figura F.4: Ventana de disponibilidad de calibres por nivel de tensión: selección de tipo de cable (monoconductor/multiconductor) para normativa IEC/RIC y NEC.

Configuración general del banco de ductos/tiro

Tipo de configuración: Banco de ductos subterráneo

Calibre a utilizar (mm²): 25

Tipo de cables en ducto: 3 Monoconductores horizontales (Flat)

Temperatura ambiente: 35 °C

Número de ductos horizontales: 2

Número de ductos verticales: 2

Distancia de enterrado del banco: 800 [mm]

Distancia entre ductos [mm]: 50,292

Diámetro interno del ducto [mm]: 127,0

Resistividad térmica del suelo: 1,50 K·m/W

Esquema de la configuración:

The schematic diagram shows four circular ducts arranged in a 2x2 grid. Each duct contains three smaller circles representing conductors, arranged in a triangular pattern.

Figura F.5: Ventana DuctWizard (GUI para DuctBankFunc): parametrización del banco de ductos (arreglo, profundidad de enterramiento, separación entre ductos, diámetro interno y resistividad térmica del suelo) y previsualización esquemática de la configuración geométrica.