

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Dimensionamento de cabos BT/caminho de  
cabos**

João Ricardo Costa Rodrigues

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: José Eduardo Neves dos Santos

1-7-2022



# Resumo

Nos dias de hoje a energia elétrica é um bem fundamental para o cotidiano de qualquer sociedade, como também para o seu desenvolvimento. Com o crescimento das necessidades energéticas, a importância desta energia chegar ao consumidor final da forma mais fiável e segura acresce igualmente. De forma que isso aconteça, o dimensionamento das instalações elétricas tem um papel fulcral na projeção de qualquer infraestrutura atual.

De forma a garantir a fiabilidade e segurança pretendidas, o dimensionamento adequado das ligações elétricas projetadas é de elevada importância. Para tornar este processo mais rápido e automatizado, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de efetuar todos os cálculos necessários, cumprindo todas as normas aplicáveis, surge como a solução mais viável para esta tarefa.

A solução encontrada consistiu no desenvolvimento da referida ferramenta em Microsoft Excel, onde é possível dimensionar todas as ligações da instalação e seus respetivos caminhos de cabos, assim podem ser validadas de forma mais prática e sistemática. Isto permite simplificar o projeto de diferentes instalações e auxiliar os engenheiros que os executam.

Nesta dissertação, encontram-se descritas as principais características dos cabos de baixa tensão e caminhos de cabos, a formalização do dimensionamento de acordo com as normas internacionais, sendo ainda detalhadas as características da aplicação computacional criada.

## **Palavras-chave**

Cabos de baixa tensão

Dimensionamento

# Abstract

*Nowadays, electrical energy is a fundamental asset for the daily life of any society, as well as for its development. With the growth of energy needs, the importance of this energy reaching the final consumer in the most reliable and safe way also increases. For this to happen, the dimensioning of electrical installations plays a key role in the design of any current infrastructure.*

*To guarantee the intended reliability and safety, the proper dimensioning of the designed electrical connections is of high importance. To make this process faster and more automated, the development of a computational tool capable of performing all the necessary calculations, complying with all applicable standards, appears as the most viable solution for this task.*

*The solution found consisted in the development of the mentioned tool in Microsoft Excel, where it is possible to dimension all the installation connections and their respective cable paths, so they can be validated in a more practical and systematic way. This makes it possible to simplify the design of different installations and assist the engineers who carry them out.*

*In this dissertation, the main characteristics of low voltage cables and cable trays are described, the formalization of the dimensioning according to international standards, and the characteristics of the computational application created are also detailed.*

## **Keywords**

*Low voltage cables*

*Dimensioning*



# Agradecimentos

Um agradecimento especial à SISINT pelo acolhimento e por me ter proporcionado a oportunidade de trabalhar num ambiente profissional, em especial ao Eng. Marco Cunha pelas orientações e disponibilidade.

Ao Prof. José Neves dos Santos pela orientação da presente tese de mestrado e pelo auxílio.

Aos meus pais, um agradecimento muito grande por toda a paciência e pelo apoio incondicional que me deram ao longo de todo o curso e por me proporcionarem todas as possibilidades para o realizar.

Aos meus irmãos, por serem sempre a minha companhia e por tudo o que fazem por mim.

À Joana, por sempre acreditar em mim e me dar aquela força que tanto me faz falta. Obrigado por tudo.

# Índice

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1 - Enquadramento .....	1
1.2 - Motivação e objetivos .....	2
1.3 - Estrutura da Dissertação .....	2
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>5</b>
Cabos de baixa tensão e caminhos de cabos .....	5
2.1 - Cabos de baixa tensão .....	5
2.1.1 - Alma condutora e condutor .....	5
2.1.2 - Camada isolante .....	7
2.1.3 - Cabo .....	8
2.1.4 - Designação .....	10
2.2 - Caminhos de cabos .....	10
2.2.1 - Capacidade de condução de corrente .....	12
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>14</b>
Dimensionamento .....	14
3.1 - Objetivos .....	14
3.2 - Corrente de serviço .....	15
3.3 - Corrente máxima admissível do cabo .....	15
3.3.1 - Métodos de instalação .....	16
3.3.2 - Fatores de correção .....	17
3.3.2.1 - Fator de correção em função da temperatura ambiente .....	17
3.3.2.2 - Fator de correção em função da temperatura do solo .....	18
3.3.2.3 - Fator de correção em função da resistividade térmica do solo .....	19
3.3.2.4 - Fator de correção em função do agrupamento de cabos .....	20
3.4 - Condição de aquecimento .....	20

3.5 - Condição de queda de tensão.....	20
3.5.1 - Queda de tensão .....	21
3.5.1.1 - Resistência linear .....	22
3.5.1.2 - Reatância linear.....	23
3.5.1 - Queda de tensão máxima admissível .....	23
3.6 - Proteção contra sobrecargas.....	24
3.7 - Proteção contra curto-circuitos .....	26
3.7.1 - Tempo de fadiga térmica da canalização.....	27
3.7.2 - Tempo de atuação da proteção .....	29
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>33</b>
Desenvolvimento da ferramenta computacional .....	33
4.1 - <i>Software</i> .....	33
4.2 - Arquitetura da ferramenta computacional.....	34
4.3 - Dados da instalação .....	36
4.4 - Dimensionamento de cabos .....	37
4.4.1 - Botões.....	37
4.4.2 - Circuito .....	39
4.4.3 - Potência .....	40
4.4.4 - Corrente de serviço .....	40
4.4.5 - Proteção .....	41
4.4.6 - Cabo.....	41
4.4.7 - Método de instalação .....	42
4.4.8 - Corrente máxima admissível.....	42
4.4.9 - Verificação do cabo .....	43
4.4.10 - Comprimento .....	43
4.4.11 - Resistência e reatância .....	43
4.4.12 - Queda de tensão .....	44
4.4.13 - Verificação da queda de tensão .....	44
4.4.14 - Impedância equivalente .....	45
4.4.15 - Corrente de curto-circuito mínima e máxima .....	45

4.4.16 - Tempo de fadiga térmica e tempo de proteção .....	45
4.4.17 - Verificação de curto-circuitos .....	46
4.5 - Dimensionamento de caminhos de cabos .....	46
4.5.1 - Botões para os circuitos .....	46
4.5.1 - Botões para os caminhos .....	47
4.5.3 - Diâmetro exterior e área transversal.....	48
4.5.4 - Identificação dos caminhos de cabos.....	48
4.5.5 - Caminhos de cabos.....	48
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>51</b>
Exemplo de cálculo.....	51
5.1 - Características da instalação .....	51
5.2 - Dimensionamento dos cabos .....	53
5.3 - Caminhos de cabos .....	56
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>59</b>
Conclusões e perspectivas de desenvolvimento .....	59
6.1 Conclusões.....	59
6.2 Perspetivas de desenvolvimento .....	60





# Lista de figuras

Figura 1.1 - Logotipo SISINT .....	2
Figura 2.1 - Esquema de um cabo monopolar [1] .....	8
Figura 2.2 - Esquema de um cabo multipolar [1] .....	9
Figura 3.1 - Curvas características tempo/corrente dos disjuntores de curva B [9] .....	30
Figura 3.2 - Curvas características tempo/corrente dos disjuntores de curva C [9] .....	30
Figura 3.3 - Curvas características tempo/corrente dos disjuntores de curva D [9] .....	31
Figura 4.1 - Fluxograma do método de dimensionamento da ferramenta .....	35
Figura 4.2 - Dados da instalação, secção Ambiente .....	36
Figura 4.3 - Dados da instalação, secção Rede .....	36
Figura 4.4 - Dados da instalação, secção Transformador .....	36
Figura 4.5 - Dados da instalação, secção Condutores .....	37
Figura 4.6 - Botão “Novo Circuito” da ferramenta .....	37
Figura 4.7 - Formulário do botão “Novo Circuito” da ferramenta .....	38
Figura 4.8 - Botão “Apagar Circuito” da ferramenta .....	38
Figura 4.9 - Formulário do botão “Apagar Circuito” da ferramenta .....	39
Figura 4.10 - Botão “Imprimir” da ferramenta .....	39
Figura 4.11 - Botões de navegação da ferramenta .....	39
Figura 4.12 - Dados do circuito na ferramenta .....	40
Figura 4.13 - Dados da potência na ferramenta .....	40
Figura 4.14 - Valor da corrente de serviço na ferramenta .....	40
Figura 4.15 - Dados da proteção do circuito na ferramenta .....	41
Figura 4.16 - Dados do cabo na ferramenta .....	41
Figura 4.17 - Método de instalação do circuito na ferramenta .....	42
Figura 4.18 - Corrente máxima admissível do circuito na ferramenta .....	42
Figura 4.19 - Verificação do cabo na ferramenta .....	43
Figura 4.20 - Comprimento do circuito na ferramenta .....	43
Figura 4.21 - Resistência e reatância na ferramenta .....	44
Figura 4.22 - Queda de tensão na ferramenta .....	44
Figura 4.23 - Verificação da queda de tensão na ferramenta .....	45
Figura 4.24 - Impedância equivalente na ferramenta .....	45
Figura 4.25 - Corrente de curto-circuito mínima e máxima na ferramenta .....	45
Figura 4.26 - Tempo de fadiga térmica e tempo de proteção na ferramenta .....	46
Figura 4.27 - Verificação de curto-circuitos na ferramenta .....	46
Figura 4.28 - Botões para os circuitos na ferramenta .....	47

Figura 4.29 - Botões para os caminhos na ferramenta .....	47
Figura 4.30 - Diâmetro exterior e área transversal na ferramenta .....	48
Figura 4.31 - Identificação dos caminhos de cabos na ferramenta .....	48
Figura 4.32 - Identificação da canalização na ferramenta .....	49
Figura 4.33 - Dimensões da canalização na ferramenta .....	49
Figura 4.34 - Áreas, número de circuitos e taxa de ocupação na ferramenta .....	49
Figura 5.1 - Características do ambiente no caso prático .....	51
Figura 5.2 - Características da rede no caso prático .....	52
Figura 5.3 - Características do transformador no caso prático .....	52
Figura 5.4 - Características dos condutores no caso prático .....	52
Figura 5.5 - Informações inseridas na ferramenta dos circuitos do caso prático .....	54
Figura 5.6 - Informações relativas à potência e proteção dos circuitos no caso prático....	54
Figura 5.7 - Informações relativas aos cabos dos circuitos no caso prático .....	55
Figura 5.8 - Informações relativas aos métodos de instalação e correntes no caso prático .....	55
Figura 5.9 - Validações dos cabos no caso prático .....	55
Figura 5.10 - Comprimento e validações das quedas de tensão no caso prático .....	56
Figura 5.11 - Validações dos curto-circuitos no caso prático .....	56
Figura 5.12 - Listagem dos circuitos e definição dos trajetos do caso prático .....	57
Figura 5.13 - Listagem dos trajetos e respectivas dimensões do caso prático .....	57
Figura 5.14 - Validação da taxa de ocupação dos trajetos do caso prático .....	57





## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Secções nominais para as diferentes almas condutoras [2] .....	7
Tabela 2.2 - Temperaturas máximas para os diferentes materiais isolantes [2] .....	7
Tabela 2.3 - Secções nominais para o condutor neutro [3].....	9
Tabela 2.4 - Características dimensionais dos tubos .....	11
Tabela 3.1 - Fatores de correção em função da temperatura ambiente [5] .....	17
Tabela 3.2 - Fatores de correção em função da temperatura do solo [5] .....	18
Tabela 3.3 - Fatores de correção em função da resistividade térmica do solo [5] .....	18
Tabela 3.4 - Resistências lineares dos condutores [2] .....	21
Tabela 3.5 - Correntes estipuladas e de funcionamento dos disjuntores [9] .....	24
Tabela 3.6 - Correntes estipuladas e de funcionamento dos fusíveis [10] .....	25
Tabela 3.7 - Valores do fator K [6] .....	26
Tabela 3.8 - Tabela de decisão para cálculo da corrente de curto-circuito [8] .....	27





# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

BT	Baixa Tensão
MT	Alta Tensão
AT	Alta Tensão
Cu	Cobre
Al	Alumínio
CC	Curto-Circuito
PVC	Policloreto de Vinilo
XLPE	Polietileno Reticulado
EPR/HEPR	Borracha de Etileno-propileno
Fc	Fator de correção
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
NP	Norma Portuguesa
PDIRT	Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Transporte de Eletricidade
RTIEBT	Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
VBA	<i>Visual Basic For Applications</i>

## Lista de símbolos

- $U$  - Valor eficaz da tensão entre dois condutores (kV)
- $I_B$  - Corrente de serviço (A)
- $P$  - Potência ativa (W)
- $\cos \varphi$  - Fator de potência

- $I_z$  - Corrente máxima admissível de um cabo (A)
- $I_z'$  - Corrente máxima admissível corrigida de um cabo (A)
- $K_1$  - Fator de correção em função da temperatura ambiente
- $K_2$  - Fator de correção em função da temperatura do solo
- $K_3$  - Fator de correção em função da resistividade térmica do solo
- $K_4$  - Fator de correção em função do agrupamento de cabos
- $Z$  - Impedância do cabo ( $\Omega$ )
- $R_{AC}$  - Resistência do cabo em corrente alternada ( $\Omega/\text{km}$ )
- $X$  - Reatância do cabo ( $\Omega/\text{km}$ )
- $l$  - Comprimento do cabo (km)
- $\varepsilon$  - Variação máxima da queda de tensão (%)
- $\alpha$  - Coeficiente de variação da resistividade com a temperatura ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ )
- $\theta$  - Valor da temperatura final da alma condutora, corresponde a temperatura máxima de funcionamento em curto-circuito ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $c$  - Fator de tensão
- $Z_{\text{eq}}$  - Impedância equivalente “vista” do ponto a calcular ( $\Omega$ )
- $t_p$  - Tempo de atuação das proteções (s)
- $t_{FT}$  - Tempo de fadiga térmica (s)
- $S$  - Secção da alma condutora ( $\text{mm}^2$ )
- $I_{CC}$  - Intensidade de corrente-curto circuito a transmitir (A)
- $K$  - Fator que depende do material da alma condutora e do isolamento do cabo

# Capítulo 1

## Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida com o objetivo de sistematizar o processo de cálculo das várias condições de validação dos cabos em baixa tensão numa instalação, de acordo com as normativas IEC aplicáveis, assim como o dimensionamento dos respetivos caminhos de cabos.

Desta forma, foi proposta a criação de uma ferramenta computacional que realize o dimensionamento de cabos e caminhos de cabos de forma eficaz e eficiente. O seu desenvolvimento tem o objetivo de se tornar numa ferramenta importante para o engenheiro que irá dimensionar tais ligações elétricas uma vez que uma tarefa deste tipo implica o conhecimento e cumprimento de várias normas nacionais e internacionais e a pesquisa e execução de cálculos trabalhosos.

### 1.1 - Enquadramento

A SISINT (figura 1.1) é uma empresa multinacional de origem portuguesa, localizada em Grijó, Vila Nova de Gaia, que tem como objetivo o fornecimento de serviços e soluções integradas de engenharia, projeto, instalação, manutenção e consultoria para os sectores da energia, transportes, infraestruturas e instalações técnicas especiais.

No domínio da energia uma das principais competências da empresa é o projeto de instalações elétricas, nomeadamente de subestações até 400kV onde as competências são abrangentes permitindo oferecer aos seus clientes soluções abrangentes que compreendem as diferentes especialidades envolvidas nomeadamente, estudos de rede, dimensionamento eletromecânico e projeto de sistemas de proteção e controlo.



Figura 1.1 - Logotipo SISINT

## 1.2 - Motivação e objetivos

Dado o incremento da atividade da empresa, sobretudo em mercados de exportação, impõe-se a necessidade de otimizar e sistematizar algumas soluções técnicas que são usadas recorrentemente.

O tema proposto é enquadrado nesse desígnio. A empresa pretende com ele encontrar soluções inovadoras que permitam oferecer aos seus clientes respostas mais económicas e eficientes aos seus problemas. Assim, é considerado muito importante o desenvolvimento do tema de dimensionamento de cabos BT e respetivos caminhos de cabos para uma mais eficaz e sistemática execução de projetos.

No desenvolvimento do trabalho, o principal foco foi a automatização do processo de dimensionamento através de uma ferramenta computacional intuitiva, que, numa primeira fase, permita ao utilizador qual o cabo BT mais adequado, que cumpra as normas aplicáveis e em função das cargas, distância, caminho de cabos, entre outros parâmetros. E na segunda fase, através da entrada de uma lista de cabos e seu respetivo trajeto, dimensione os vários caminhos de cabos envolvidos.

## 1.3 - Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos.

No primeiro capítulo, encontra-se a motivação e objetivos inerentes ao trabalho realizado.

No segundo capítulo é exposta a fundamentação teórica relevante, nomeadamente a análise das várias normas construtivas dos cabos de baixa tensão assim como uma exposição dos caminhos de cabos.

No terceiro capítulo são descritos o método de dimensionamento e a verificação das várias condições de segurança.

No quarto capítulo descreve-se a ferramenta desenvolvida. Encontra-se a justificação da escolha de software, assim como a descrição das várias funcionalidades da aplicação.

No quinto capítulo é exemplificada a utilização da ferramenta.

Finalmente, no sexto e último capítulo encontram-se as conclusões finais resultantes da elaboração da presente dissertação, assim como possíveis perspectivas de desenvolvimento.



## Capítulo 2

# Cabos de baixa tensão e caminhos de cabos

Neste capítulo serão expostos os conceitos e definições sobre os cabos de baixa tensão e caminhos de cabos mais importantes na elaboração deste trabalho, como também as normas que definem certos parâmetros nas suas características.

### 2.1 - Cabos de baixa tensão

Na constituição de qualquer cabo existem vários conceitos importantes a serem abordados, de forma que na altura da decisão seja escolhido o cabo com as melhores características para um determinado fim. Dentro destes conceitos fazem parte a alma condutora, o condutor e o isolamento.

#### 2.1.1 - Alma condutora e condutor

A alma condutora é o elemento destinado à condução elétrica, podendo ser constituído por um fio (condutor unifilar), por um conjunto de fios devidamente reunidos e não isolados entre si (condutor multifilar) ou por perfis adequados. [1] A alma condutora pode ser decomposta pela natureza do material, os vários tamanhos em que é formada, denominada de secção nominal, a composição, nomeadamente a flexibilidade, e a sua forma.

O conceito de condutor é a designação que abrange os condutores nus, os condutores isolados e os cabos. É considerado um condutor isolado quando uma alma condutora é revestida por uma ou mais camadas de material isolante, garantindo o seu

isolamento elétrico, ao contrário de um condutor nu, que não possui qualquer isolamento elétrico no seu exterior.

Todos os parâmetros referidos para a construção de um condutor encontram-se normalizados pela normal internacional IEC 60228. Esta define as várias classes dos condutores e matérias a ser utilizados no seu fabrico, como também a secção nominal do condutor e os limites máximos de resistência em corrente contínua dos mesmos, que serão abordados mais à frente.

Os condutores são classificados em quatro classes:

- Classe 1: condutores rígidos
- Classe 2: condutores multifilares
- Classe 5: condutores flexíveis
- Classe 6: Condutores mais flexíveis que os da classe 5

Os materiais utilizados para o fabrico das almas condutoras são:

- Cobre
- Alumínio ou liga de alumínio

As secções nominais para as diferentes almas condutoras estão apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Secções nominais para as diferentes almas condutoras [2]

Secção nominal (mm <sup>2</sup> )	
Alma condutora de cobre	Alma condutora de alumínio
1.5	-
2.5	2.5
4	4
6	6
10	10
16	16
25	25
35	35
50	50
70	70
95	95
120	120
150	150
185	185
240	240
300	300
400	400
500	500
630	630

### 2.1.2 - Camada isolante

A camada isolante, podendo também ser designada por isolação, é constituída por compostos dielétricos sólidos, na maioria dos casos aplicados por extrusão. Aspetos como a espessura, marcação dos condutores, ou cores de fabrico, são determinados por normas próprias. [1]

Os vários tipos de isolantes podem ser agrupados em duas famílias, os materiais termoplásticos e os materiais elastómeros e polímeros reticuláveis. Os mais comuns são os seguintes:

- Policloreto de Vinilo - conhecido pela sigla PVC;
- Polietileno Reticulado - conhecido pela sigla PEX (ou XLPE);
- Borracha de Etileno-propileno - conhecida pela sigla EPM.

Cada tipo de material utilizado no isolamento tem associada à sua temperatura máxima de funcionamento normal e de curto-circuito como é apresentado na tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Temperaturas máximas para os diferentes materiais isolantes [2]

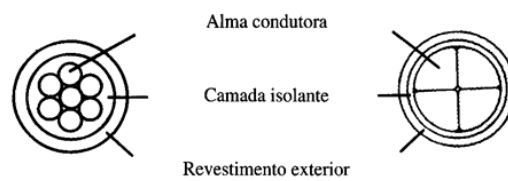
Material do isolamento	Temperatura máxima do condutor (°C)	
	Temperatura máxima de funcionamento (°C)	Temperatura máxima em curto-circuito (°C) (duração máxima de 5s)
Policloreto de Vinilo (secção ≤ 300 mm <sup>2</sup> ) (PVC)	70	160
Policloreto de Vinilo (secção > 300 mm <sup>2</sup> ) (PVC)	70	140
Polietileno Reticulado (XLPE)	90	250
Borracha de Etileno- propileno (EPR e HEPR)	90	250

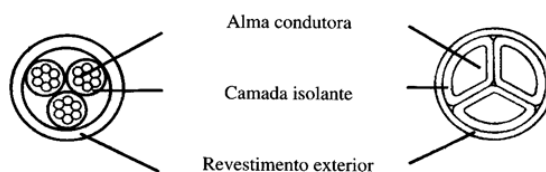
### 2.1.3 - Cabo

No que se refere ao termo cabo, existem dois casos a serem considerados, o condutor isolado e o conjunto de condutores isolados.

O condutor isolado, como o nome indica, possui apenas um condutor e é dotado de revestimento exterior que pode consistir de várias camadas com diferentes funções. Este tipo de condutor pode também ser designado por cabo unipolar, monopolar ou mono-condutor e está representado na figura 2.1.

O conjunto de condutores isolados consiste no agrupamento de vários condutores, providos de uma envolvente comum, como é apresentado na figura 2.2. Também conhecido por cabo multipolar ou multi-condutor.

**Figura 2.1** - Esquema de um cabo monopolar [1]



**Figura 2.2** - Esquema de um cabo multipolar [1]

Um cabo multipolar pode ter na sua constituição vários condutores com diferentes funções, onde os mais importantes salientar são os condutores ativos e os condutores de proteção.

O condutor ativo é o condutor afeto à condução de corrente elétrica. Em corrente alternada, os condutores ativos são os condutores de fase e o condutor neutro. Já o condutor de proteção é destinado a assegurar a ligação entre um ponto da instalação e o circuito de proteção, que por sua vez está ligado ao elétrodo de terra [1].

A secção nominal do condutor neutro deverá ser igual à secção dos condutores de fase, para secções nominais iguais ou inferiores a 16 mm<sup>2</sup> quando a alma condutora é de cobre ou secções nominais iguais ou inferiores a 25 mm<sup>2</sup> quando a alma condutora é de alumínio. Para secções nominais superiores, a secção do condutor neutro, não deverá ser inferior à indicada na tabela 2.3.

**Tabela 2.3** - Secções nominais para o condutor neutro [3]

Secção do condutor de fase (mm <sup>2</sup> )	Secção do condutor neutro (mm <sup>2</sup> )	
	Alma condutora de cobre	Alma condutora de alumínio
25	16	-
35	16	16
50	25	25
70	35	35
95	50	50
120	70	70
150	70	70
185	95	95
240	120	120
300	150	150

Caso a secção do condutor fase seja superior às da tabela, a regra para determinar a secção de neutro reduzida é a secção aproximada por excesso da metade da secção do condutor de fase.

### 2.1.4 - Designação

A designação de condutores isolados, ou cabos, é feita mediante a utilização de um conjunto de símbolos seguido a norma HD 361, onde cada símbolo tem um determinado significado associado, agrupados num código alfanumérico com 5 partes:

- Parte 1: Normalização do cabo;
- Parte 2: Tensão;
- Parte 3: Constituintes, tais como o isolamento, revestimento e bainha;
- Parte 4: Construção, onde é expressa a forma, natureza e flexibilidade do cabo;
- Parte 5: Composição do cabo, número de condutores e secção.

No desenvolvimento da ferramenta computacional desenvolvida, de forma que esta fosse o mais simples e fiável possível, na designação apenas analisa e exporta dados automáticos da composição do cabo, sendo os outros dados introduzidos pelo utilizador. Nessa designação é possível observar o número de condutores e a secção destes, como também a eventual presença do condutor neutro reduzido e condutor de proteção.

## 2.2 - Caminhos de cabos

As canalizações elétricas são o conjunto constituído por um ou mais condutores e pelos elementos que asseguram o seu isolamento elétrico, as suas proteções mecânicas, químicas e elétricas, e a sua fixação, devidamente agrupados e com aparelhos de ligação comuns [1].

Tipos de canalizações:

- Canalização fixa;
- Canalização amovível;
- Canalização à vista;
- Canalização oculta.

Dentro canalizações fixas existem as canalizações pré-fabricadas, que são canalizações de fabrico em série, isto é, montadas em fábrica, contendo, numa conduta ou invólucro, os elementos condutores (barras) separados e suportados por elementos isolantes [1]. Destas canalizações fazem parte as calhas para iluminação, calhas para rodapés e paredes e calhas de chão.

Existem também as canalizações fixas ocultas, que são canalizações embebidas em paredes, tetos e pavimento, de onde fazem parte o tubo anelado e o tubo VD. Os diâmetros destes tubos estão na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 - Características dimensionais dos tubos**

Diâmetro (mm)
12
16
20
25
32
40
50
63
75
90
110

Outro tipo de canalizações são canalizações estabelecidas em espaços ociosos de construções, como tetos, paredes ou pavimentos, onde estão inseridos os caminhos de cabos.

As canalizações em caleiras são formadas por um canal feito num pavimento e dotado de tampa amovível, usada normalmente no trajeto entre o lado de baixa tensão do transformador e o Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT).

Por fim, as canalizações enterradas podem ser de três tipos: Sem fixação

- Enterradas diretamente no solo;
- Enfiadas em caleiras de betão;
- Enfiadas em tubos de material termoplástico ou de fibrocimento.

De forma a considerar todas as canalizações existentes e de forma a simplificar a ferramenta computacional, estas serão as opções usadas no dimensionamento de caminhos de cabos:

- Sem fixação
- Fixação direta;
- Conduitas circulares;
- Conduitas não circulares;
- Calhas;
- Caminhos de cabos;
- Auto-suportados.

### 2.2.1 - Capacidade de condução de corrente

Os cabos elétricos podem ser instalados de inúmeras formas. Podem estar acondicionados em condutas que variam na forma e no material, sendo cada modo de instalar denominado de método de instalação.

Para cada método de instalação está associado um método de referência. A norma IEC 60364 5-32 estabelece estes métodos de referência, os quais correspondem aos métodos de instalação que tiveram a capacidade de condução de corrente dos condutores determinadas via ensaios ou cálculos, visando não ultrapassar os limites de temperaturas que acarretam danos ao isolamento dos cabos. Foram determinados 9 métodos de referências, os quais são utilizados para caracterizar os métodos de instalações possíveis.

Os métodos de referência são:

- A1: que corresponde a condutores isolados em conduta de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- A2: que corresponde a cabo multipolar em conduta de seção circular embutido em parede termicamente isolante;
- B1: que corresponde a condutores isolados em conduta de seção circular sobre parede ou teto;
- B2: que corresponde a cabo multipolar em conduta de seção circular sobre parede ou teto;
- C: que corresponde a cabos unipolares ou cabo multipolar fixados na parede;
- D: que corresponde a cabo multipolar em conduta enterrado no solo;
- E: que corresponde a cabo multipolar ao ar livre;
- F: que corresponde a cabos unipolares juntos (na horizontal, na vertical ou em *trefoil*) ao ar livre;
- G: que corresponde a cabos unipolares ao ar livre com espaçamento entre eles (na horizontal ou na vertical).



## Capítulo 3

# Dimensionamento

O objetivo deste capítulo é apresentar, de forma sintética, os processos e cálculos envolvidos no processo de dimensionamento realizado pela ferramenta computacional.

### 3.1 - Objetivos

O dimensionamento de um cabo não depende apenas da corrente que o atravessa, mas sim de fatores como o modo de instalação do mesmo, a influência dos fatores atmosféricos, a presença de outros cabos e a temporização dos mecanismos de proteção.

A resolução deste problema envolve também a verificação de um conjunto de condições de índole técnica [4].

A primeira fase do dimensionamento passa pela escolha do tipo de condutor, ou cabo, e o tipo de montagem que define a canalização elétrica. Depois, é escolhido o tipo de proteção a utilizar. Por fim, é determinada a secção normalizada e o calibre da proteção que satisfazem simultaneamente as várias condições técnicas: a condição de aquecimento, a condição de queda de tensão, a proteção contra sobrecargas e proteção contra curto-circuitos.

### 3.2 - Corrente de serviço

A corrente de serviço ( $I_B$ ) corresponde à intensidade de corrente de carga que serve como base ao dimensionamento da instalação e que resulta da alimentação da potência de carga estimada para a instalação considerando a tensão nominal [4]. Onde a tensão nominal varia se o circuito for monofásico ou trifásico.

A fórmula de cálculo para a corrente de serviço é a seguinte:

$$I_B = \frac{P}{k \times U \times \cos \varphi} \quad (A) \quad (3.1)$$

Em que:

- P é a potência a alimentar pelo circuito, expressa em W;
- U é o valor de tensão composta, expressa em V;
- $\cos \varphi$  é o valor do fator de potência.

Existe um fator que pode ser considerado no cálculo da corrente de serviço, o fator de simultaneidade. O fator de simultaneidade é um fator estimativo que tem em consideração o facto de em uma instalação nunca estarem ligados em simultâneo, nem com força máxima, todos os dispositivos. O valor deste fator surge automaticamente como unitário, sendo possível de alterar pelo utilizador. O novo valor da corrente de serviço surge da multiplicação entre esta e o fator de simultaneidade atribuído.

### 3.3 - Corrente máxima admissível do cabo

A corrente máxima admissível de um cabo ( $I_z$ ) é dos parâmetros mais importantes e limitadores no dimensionamento de cabos. Corresponde ao maior valor de corrente que pode circular na canalização elétrica em regime permanente. Devido às suas características construtivas os cabos poderão funcionar em regime permanente a uma temperatura máxima que determina, por sua vez, o valor máximo de intensidade de corrente que podem veicular [4].

A intensidade de corrente máxima admissível numa canalização depende, para além das características dimensionais, elétricas e térmicas dos cabos, das condições de instalação dos mesmos, já que estes fatores condicionam diretamente a dissipação das perdas térmicas geradas nos cabos [1].

Com todos os dados construtivos do cabo e o respetivo método de instalação é possível obter o valor desta corrente pela análise das tabelas da norma IEC 60364 5-32, assim como os fatores de correção associados.

Após a obtenção de  $I_Z$  e dos fatores de correção necessários deve-se multiplicar estes valores entre si de forma a obter a corrente máxima admissível corrigida  $I_Z'$ , como mostra a expressão 3.2.

$$I_Z' = I_Z \times K1 \times K2 \times K3 \times K4 \quad (A) \quad (3.2)$$

Em que:

- $I_Z$  é a corrente máxima admissível de um cabo, expressa em A
- $I_Z'$  é a corrente máxima admissível corrigida de um cabo, expressa em A
- $K1$  é o fator de correção em função da temperatura ambiente
- $K2$  é o fator de correção em função da temperatura do solo
- $K3$  é o fator de correção em função da resistividade térmica do solo
- $K4$  é o fator de correção em função do agrupamento de cabos

### 3.3.1 - Métodos de instalação

Os métodos de instalação considerados nesta ferramenta são determinados por duas opções variáveis, a instalação e situação. As combinações destas variáveis resultam, pela análise da Tabela 52-2 da Norma IEC 60364 5-32, na atribuição de um número. Este número representa o método de instalação do cabo em questão na Tabela 52-3 desta mesma norma, onde cada método está associado a uma referência.

Na opção da instalação existem as seguintes opções:

- Sem fixação;
- Fixação direta;
- Conduas circulares;
- Conduas não circulares;
- Calhas;
- Caminhos de cabos.

No caso da situação existem as seguintes opções:

- Ocos de construção;
- Caleiras;
- Enterradas;
- Embebidas;
- À vista.

Visto isto, com a referência do método de instalação e com os dados da alma condutora, o isolamento e o número de condutores carregados, é possível encontrar na Tabela A.52-2 à Tabela A.52-13 da Norma IEC 60364 5-32, os valores da corrente máxima admissível do cabo.

### **3.3.2 - Fatores de correção**

Com a definição do método de instalação é importante ter em consideração fatores como as temperaturas ambiente e do solo, profundidade de enterramento e resistividade do solo visto que estas condições possam ser diferentes daquelas em que os cabos foram testados. Assim, devem-se multiplicar os valores de  $I_z$  pelos fatores de correção adequados.

#### **3.3.2.1 - Fator de correção em função da temperatura ambiente**

Fator pelo qual deve ser multiplicado o valor da corrente máxima admissível do cabo caso o valor da temperatura ambiente na instalação ao ar seja diferente da normalizada pela norma ou fabricante. A aplicação deste fator apenas é válida para canalizações instaladas ao ar.

A Tabela A.52-14 da Norma IEC 60364 5-32, representada na tabela 3.1, apresenta os valores deste fator de correção para várias temperaturas ambientes.

**Tabela 3.1 - Fatores de correção em função da temperatura ambiente [5]**

Temperatura ambiente °C	Fator de correção	
	PVC	XLPE ou EPR
10	1.22	1.15
15	1.17	1.12
20	1.12	1.08
25	1.06	1.04
30	1	1
35	0.94	0.96
40	0.87	0.91
45	0.79	0.87
50	0.71	0.82
55	0.61	0.76
60	0.5	0.71
65	-	0.65
70	-	0.58
75	-	0.5
80	-	0.41
85	-	-
90	-	-

### 3.3.2.2 - Fator de correção em função da temperatura do solo

Fator pelo qual deve ser multiplicado o valor da corrente máxima admissível do cabo caso o valor da temperatura do solo na instalação seja diferente da normalizada pela norma ou fabricante. A aplicação deste fator apenas é válida para canalizações diretamente enterradas ou enterradas em tubos.

A Tabela A.52-15 da Norma IEC 60364 5-32, representada na tabela 3.2, apresenta os valores deste fator de correção para várias temperaturas do solo.

Tabela 3.2 - Fatores de correção em função da temperatura do solo [5]

Temperatura do solo °C	Fator de correção	
	PVC	XLPE ou EPR
10	1.1	1.07
15	1.05	1.04
20	1	1
25	0.95	0.96
30	0.89	0.93
35	0.84	0.89
40	0.77	0.85
45	0.71	0.8
50	0.63	0.76
55	0.55	0.71
60	0.45	0.65
65	-	0.6
70	-	0.53
75	-	0.46

### 3.3.2.3 - Fator de correção em função da resistividade térmica do solo

A resistividade térmica do solo é um fator que influencia a corrente máxima admissível numa canalização, difícil de avaliar pois depende de vários fatores como a resistividade própria dos materiais que constituem o solo, a sua compactação, humidade, etc. [1]. Este fator apenas é considerado em canalizações diretamente enterradas ou enterradas em tubos.

A Tabela A.52-16 da Norma IEC 60364 5-32, representada na tabela 3.3, apresenta os valores deste fator de correção para várias resistividades térmicas do solo.

Tabela 3.3 - Fatores de correção em função da resistividade térmica do solo [5]

Resistência térmica específica do solo [K·m/W]	Fator de correção
0.5	1.28
0.7	1.2
1	1.18
1.5	1.1
2	1.05
2.5	1
3	0.96

### 3.3.2.4 - Fator de correção em função do agrupamento de cabos

O fator de correção em função do agrupamento de cabos pode ser influenciado por vários fatores e é fundamental na escolha da secção do cabo a dimensionar. Depende:

- Das características das canalizações colocadas na proximidade da canalização em estudo, incluindo, eventualmente, o número de cabos colocados em paralelo, tipos, secções e dimensões dos mesmos, bem como intensidades transmitidas;
- Da disposição relativa das canalizações nos locais onde mais se aproximam;
- Das características térmicas do solo (quando diretamente enterrados ou enterrados em tubos).

Na Norma IEC 60364 5-32, da Tabela A.52-17 à Tabela A.52-21 é possível encontrar as várias tabelas com os valores deste fator para os diferentes modos de instalação referidos anteriormente.

## 3.4 - Condição de aquecimento

Após determinar o valor da intensidade de corrente de serviço,  $I_B$ , da canalização a dimensionar é possível obter uma primeira indicação relativa ao valor da secção a adotar tendo em conta a condição de aquecimento dos condutores. Esta condição indica que a secção a utilizar deverá estar associada a uma intensidade de corrente máxima admissível ( $I_Z$  ou  $I_Z'$  caso precedida de correção) que seja não inferior à intensidade de corrente de serviço [4]. Desta forma, garante-se a capacidade de o cabo dimensionado veicular a corrente sem sofrer degradação.

$$I_B \leq I_Z \quad (3.3)$$

## 3.5 - Condição de queda de tensão

No dimensionamento de uma instalação elétrica é essencial analisar o valor das quedas de tensão no ponto de alimentação da carga, ou seja, a variação percentual entre os pontos da canalização de tensão máximo e mínimo. Assim, é possível saber se a tensão disponível é suficiente, respeitando os limites mínimos definidos.

A condição de queda de tensão tem a função de garantir a que queda de tensão da canalização ( $\Delta U$ ) não seja superior à queda de tensão máxima admissível ( $\varepsilon \cdot U$ ), como representa a equação 3.4.

$$|\Delta U| \leq \varepsilon \cdot U \quad (3.4)$$

Em que,

- $\varepsilon.U$  é a queda de tensão máxima admissível, expressa em V;
- $\varepsilon$  é a variação máxima da queda de tensão;
- $U$  é a tensão nominal composta do sistema, expressa em V;

Ambas as partes da condição serão abordadas em detalhe em 3.5.1 e 3.5.2, respetivamente.

### 3.5.1 - Queda de tensão

O cálculo da queda de tensão é calculado conforme a tipologia do circuito, por isso, existem duas formas de cálculo: para circuitos monofásicos e trifásicos equilibrados e para circuitos trifásicos desequilibrados.

A expressão 3.5 apresenta a fórmula de cálculo para a queda de tensão para circuitos monofásicos e trifásicos equilibrados.

$$\Delta U = \underline{Z} \times \underline{I_B} \times b \approx (R_F \cos \varphi + X_F \sin \varphi) \times l \times I_B \times b \quad (V) \quad (3.5)$$

A expressão 3.5 apresenta a fórmula de cálculo para a queda de tensão para trifásicos desequilibrados.

$$\Delta U = \underline{Z} \times \underline{I_B} \approx \{(R_F + R_N) \cos \varphi + (X_F + X_N) \sin \varphi\} \times l \times I_B \quad (V) \quad (3.6)$$

Em que,

- $Z$  é a impedância do cabo, expressa em  $\Omega$ ;
- $I_B$  representa a intensidade da corrente de serviço, expressa em A;
- $b$  representa um coeficiente de valor 1 para circuitos trifásicos equilibrados ou valor 2 para circuitos monofásicos;
- $R_F$  é a resistência linear do condutor de fase, expressa em  $\Omega/\text{km}$ ;
- $R_N$  é a resistência linear do condutor neutro, expressa em  $\Omega/\text{km}$ ;
- $X_F$  é a reatância linear do condutor de fase, expressa em  $\Omega/\text{km}$ ;
- $X_N$  é a reatância linear do condutor neutro, expressa em  $\Omega/\text{km}$ ;
- $l$  é o comprimento do cabo, expresso em km;
- $\cos \varphi$  representa o fator de potência.

É fundamental considerar o valor da resistência linear à temperatura máxima de funcionamento, em regime permanente, de forma a garantir uma situação mais

desfavorável. Na tabela 2.2 é possível encontrar os valores máximos da temperatura consoante o material do isolamento do cabo.

### 3.5.1.1 - Resistência linear

Os valores da resistência linear do condutor têm várias formas de ser obtido, através de cálculo com base nas características do condutor, pelos valores normalizados ou pelo próprio fabricante. No desenvolvimento desta ferramenta foi optado pelos valores normalizados porque são fiáveis e com margens de erro muito curtas, como também tornam a ferramenta mais eficiente.

A norma internacional que normaliza estes valores é a IEC 60228, a mesma que classifica os condutores pelas várias classes. Na tabela 3.4 é possível ver os valores das resistências lineares em função da alma condutora e da classe. É de salientar que a norma define a resistência máxima permitida a 20°C, sendo necessário corrigir as resistências para a temperatura de funcionamento do condutor quando é calculada a queda de tensão.

**Tabela 3.4 - Resistências lineares dos condutores [2]**

Secção (mm <sup>2</sup> )	Resistência DC a 20 °C (Ω/km)		
	Cobre		Alumínio
	Classe 1 e 2	Classe 5 e 6	Classe 1 e 2
0.5	36	39	-
0.75	24.5	26	-
1	18.1	19.5	-
1.5	12.1	13.3	18.1
2.5	7.41	7.98	12.1
4	4.61	4.95	7.41
6	3.08	3.3	4.61
10	1.83	1.91	3.08
16	1.15	1.21	1.91
25	0.727	0.78	1.2
35	0.524	0.554	0.868
50	0.387	0.386	0.641
70	0.268	0.272	0.443
95	0.193	0.206	0.32
120	0.153	0.161	0.253
150	0.124	0.129	0.206
185	0.0991	0.106	0.164
240	0.0754	0.0801	0.125
300	0.0601	0.0641	0.1
400	0.047	0.0486	0.0778

500	0.0366	0.0384	0.0605
630	0.0283	0.0287	0.0469

Para corrigir a resistência é utilizada uma expressão de variação da resistência com a temperatura, representada na expressão 3.7.

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1} \{1 - \alpha (\theta_2 - \theta_1)\} \quad (3.7)$$

Em que,

- $\theta_1$  representa a temperatura de referência, que neste caso são 20°C;
- $\theta_2$  representa a temperatura final ou de funcionamento, expressa em °C;
- $R_{\theta_1}$  representa a resistência linear á temperatura de referência, expressa em  $\Omega/\text{km}$ ;
- $R_{\theta_2}$  representa a resistência linear á temperatura final, expressa em  $\Omega/\text{km}$ ;
- $\alpha$  representa coeficiente de variação da resistividade com a temperatura, expressa em °C<sup>-1</sup>. Toma valores de  $3.95 \times 10^{-3}$  (°C<sup>-1</sup>) para almas condutoras de cobre e  $3.80 \times 10^{-3}$  (°C<sup>-1</sup>) para almas condutoras de alumínio [6];

### 3.5.1.2 - Reatância linear

Tal como a anterior, a reactância linear tem várias formas de ser obtida. Na ferramenta computacional em desenvolvimento, é seguida a recomendação da RTIEBT para o uso do valor de 0,08  $\Omega/\text{km}$  como valor geral para todos os condutores. O utilizador tem sempre a possibilidade de usar outro valor mais preciso, caso pretenda. 3.5.1.2

### 3.5.2 - Queda de tensão máxima admissível

A queda de tensão máxima admissível ( $\epsilon.U$ ) depende do tipo de instalação. Este valor de  $\epsilon$  não deve, geralmente, ultrapassar os 3 a 5% para circuitos de iluminação e outros circuitos, respetivamente, em instalações alimentadas diretamente a partir de uma rede de distribuição pública em baixa tensão e os valores de 6 a 8% para os mesmos circuitos em instalações alimentadas a partir de um posto de transformação MT/BT.

### 3.6 - Proteção contra sobrecargas

As proteções têm um papel fundamental na proteção do circuito contra sobrecargas. A escolha da proteção do circuito é feita através da utilização de disjuntores ou fusíveis. Estes são caracterizados pelas suas correntes nominais ( $I_n$ ), também denominadas por calibre ou valor de regulação da proteção, e pela sua corrente convencional de funcionamento ( $I_f$  ou  $I_2$ ).

A primeira condição implica que a corrente nominal da proteção ( $I_n$ ) seja superior ou igual à corrente de serviço da canalização ( $I_B$ ) e inferior ou igual à corrente máxima admissível da canalização ( $I_{Z'}$ ), como representado na expressão 3.8.

$$I_B \leq I_n \leq I_{Z'} \quad (3.8)$$

A segunda condição diz que a corrente convencional de funcionamento da proteção ( $I_f$ ) deve ser igual ou inferior à corrente máxima admissível da canalização ( $I_{Z'}$ ) multiplicada por um fator de 1,45, como representado na expressão 3.9.

$$I_f \leq 1,45 \times I_{Z'} \quad (3.9)$$

As correntes de regulação e as correntes de funcionamento dos disjuntores e dos fusíveis estão apresentadas na tabela 3.5 e 3.6, respetivamente.

Tabela 3.5 - Correntes estipuladas e de funcionamento dos disjuntores [].

Disjuntores	
Corrente estipulada (A)	Corrente de funcionamento (I <sub>r</sub> )
2	-
4	-
6	8.7
8	11.6
10	14.5
16	23.2
20	29
25	36.25
32	46.4
40	58
50	72.5
63	91.35
80	116
100	145
125	181.25
160	208
200	260
250	325
315	409.5
400	520
500	650
630	819
800	1040
1000	1300
1250	1625
1600	2080
2000	2600

Tabela 3.6 - Correntes estipuladas e de funcionamento dos fusíveis [].

Fusíveis	
Corrente estipulada (A)	Corrente de funcionamento ( $I_f$ )
2	4
4	8
6	11
8	15
10	19
12	21
16	28
20	35
25	44
32	51
40	64
50	80
63	101
80	128
100	160
125	200
160	256
200	320
250	400
315	504
400	640
500	800
630	1008
800	1280
1000	1600
1250	2000

### 3.7 - Proteção contra curto-circuitos

Durante o curto-circuito a corrente que circula no cabo possui uma intensidade muito superior à que circula em regime permanente. Este aumento na intensidade da corrente provoca um aumento significativo na temperatura da alma condutora, superior à temperatura em funcionamento normal como se vê na tabela 2.2.

De forma a proteger a integridade dos materiais que constituem o cabo e da carga que é alimentada são instalados mecanismos de corte que atuam num intervalo de tempo muito curto. Consoante a duração do defeito pode-se considerar dois tipos de processo: adiabático ou não adiabático. Um sistema é descrito como adiabático quando

não ocorrem trocas de calor entre a vizinhança dos materiais. Considera-se um curto-circuito como adiabático quando a sua duração é inferior a cinco segundos.

Visto isto, esta proteção tem como objetivo garantir que a proteção atue antes de ser atingida a temperatura de fadiga térmica da canalização. A temperatura de fadiga térmica representa a temperatura acima da qual há deterioração irreversível dos isolantes ou almas condutoras. [7]

As condições estão representadas nas expressões 3.10 e 3.11.

$$t_p < t_{FT} \quad (3.10)$$

$$t_p \leq 5 \text{ s} \quad (3.11)$$

Em que:

- $t_p$  representa o tempo de atuação da proteção, expressa em s;
- $t_{FT}$  representa a tempo de fadiga térmica da canalização, expressa em s;

### 3.7.1 - Tempo de fadiga térmica da canalização

A expressão de cálculo do tempo de fadiga térmica está representada na expressão 3.12. Este tempo depende da corrente de curto-circuito, da secção do cabo e da natureza do metal condutor.

$$t_{FT} = \left( K \times \frac{S}{I_{CC}} \right)^2 \text{ (s)} \quad (3.12)$$

Em que:

- $S$  é a secção da alma condutora, expressa em  $\text{mm}^2$ ;
- $I_{CC}$  é a intensidade de corrente curto-circuito a transmitir, expressa em A;
- $K$  é um fator que depende do material da alma condutora e do isolamento do cabo. Os valores que  $K$  pode apresentar encontram-se na tabela 3.2 [6].

Tabela 3.7 - Valores do fator K [6]

Material da alma condutora	Tipo de isolamento		
	PVC $\leq 300 \text{ mm}^2$	PVC $> 300 \text{ mm}^2$	EPR/HEPR e XLPE
Cobre	115	103	143
Alumínio	76	68	94

De forma a calcular a corrente de curto-circuito ( $I_{CC}$ ) mais desfavorável, ou seja, a que origina maior aquecimento da canalização elétrica até à atuação das proteções, é seguida a uma tabela de decisão [8], representada na tabela 3.8. Com esta informação, a partir do tipo de canalização é possível determinar o tipo de curto-circuito a simular para as correntes de curto-circuito mínima e máxima, o ponto onde é calculado e secção do condutor a usar no cálculo da fadiga térmica.

**Tabela 3.8** - Tabela de decisão para cálculo da corrente de curto-circuito [8]

Tipo de canalização	Tipo de curto-circuito a simular	Corrente de curto-circuito	Ponto da canalização aonde é calculado	Secção do condutor onde deve ser avaliada a fadiga térmica
Trifásica com neutro	Fase-Neutro	Mínima	Fim	Neutro
	Fase-Neutro	Máxima	Início	Neutro
	Trifásico	Máxima	Início	Neutro
Trifásica sem neutro	Fase-Fase	Mínima	Fim	Neutro
	Trifásico	Máxima	Início	Fase
Monofásica	Fase-Neutro	Mínima	Fim	Fase
	Fase-Neutro	Máxima	Início	Fase

Visto isto, as expressões de cálculo da corrente de curto-circuito trifásico, fase-fase e fase-neutro estão representadas nas expressões 3.13, 3.14 e 3.15, respetivamente.

$$I_{CC-3F} = c \times \frac{U_{nk}}{Z_{eqk}} \quad (pu) \quad (3.13)$$

$$I_{CC-FF} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times c \times \frac{U_{nk}}{Z_{eqk}} \quad (pu) \quad (3.14)$$

$$I_{CC-FN} = 3 \times c \times \frac{U_{nk}}{(|Z_{Fk} + Z_{Nk}|)} \quad (pu) \quad (3.15)$$

Em que:

- $U_{nk}$  representa a tensão nominal no ponto k;
- $Z_{eqk}$  representa a impedância equivalente vista do ponto k;
- $Z_{Fk}$  representa a impedância de fase vista do ponto k;
- $Z_{Nk}$  representa a impedância de neutro vista do ponto k;
- c representa um coeficiente de valor 0,95 para a corrente de curto-circuito mínima e de 1 para a corrente de curto-circuito máxima para baixa tensão.

O cálculo de  $Z_{eq,k}$  depende principalmente do ponto K onde é calculado o defeito. Pode depender também dos valores das impedâncias da rede, do ponto de ligação do sistema à rede, da linha de ligação e do transformador. Valores como a razão X/R e as correntes de curto-circuito máximas e mínimas nos pontos de ligação podem ser encontradas no relatório PDIRT (Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede Nacional de Transporte de Eletricidade) do ano em vigor. Com isto é possível calcular o tempo de fadiga térmica.

### 3.7.2 - Tempo de atuação da proteção

A determinação do tempo de atuação da proteção é feita através da análise da característica de funcionamento tempo/corrente da proteção, onde a corrente é a corrente de curto-circuito calculada anteriormente

Assim, para qualquer valor da corrente de curto-circuito que possa sobrevir na instalação, deverá assegurar-se que o tempo de atuação do aparelho de proteção é inferior ao tempo ao fim do qual o condutor se começa a degradar, ou seja o tempo de fadiga térmica da canalização, para o mesmo valor da corrente de curto-circuito.

Nos disjuntores, serão abordadas três curvas de funcionamento que se encontram normalizadas pela norma IEC 60898, estas curvas definem o tipo de carga e a curva de atuação do disjuntor. As curvas em questão são a curva B, C e D, representadas nas imagens 3.1, 3.2 e 3.3, respetivamente. Cada curva possui uma gama de atuação onde a corrente instantânea é suportada, estas são:

- 3 a 5 vezes a corrente nominal para a curva B;
- 5 a 10 vezes a corrente nominal para a curva C;
- 10 a 20 vezes a corrente nominal para a curva D.

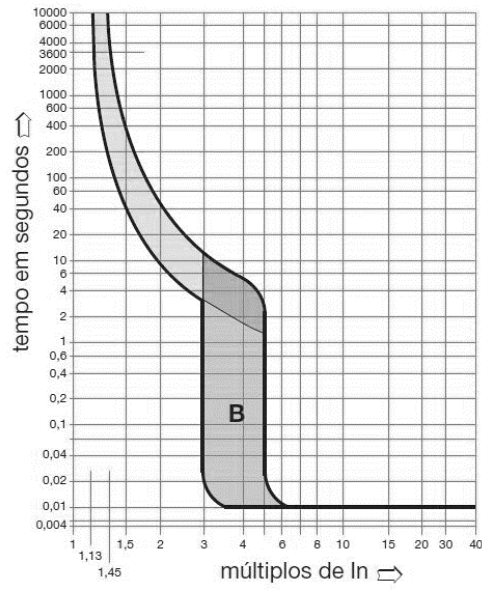


Figura 3.1 - Curvas características tempo/corrente dos disjuntores de curva B [9]

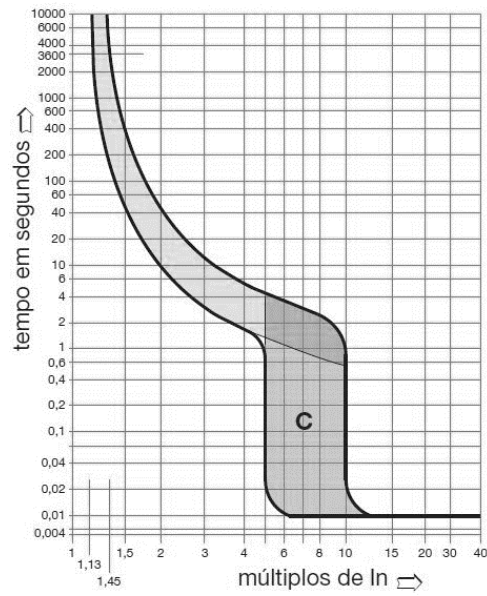


Figura 3.2 - Curvas características tempo/corrente dos disjuntores de curva C [9]

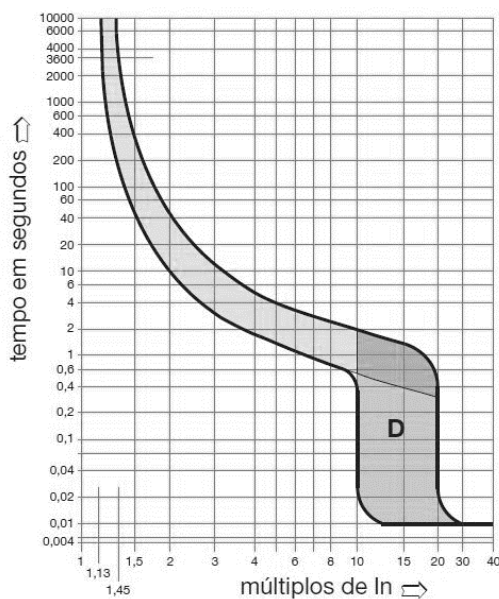


Figura 3.3 - Curvas características tempo/corrente dos disjuntores de curva D [9]

Se a corrente que percorre os disjuntores estiver entre os limites referidos de cada curva, o tempo de atuação da proteção será inferior a 0,1s, protegendo de imediato a canalização de correntes de curto-circuito elevadas que a poderiam danificar.

Na proteção por fusíveis existem dois tipos de fusíveis que serão abordados, os fusíveis de ação lenta do tipo gG e os fusíveis de ação rápida aM. As suas curvas de funcionamento são constituídas pela intensidade e pelo tempo de fusão do fusível. Quanto maior for a corrente percorrida pelo fusível, acima dos limites para um determinado calibre, o tempo de fusão, ou tempo de atuação da proteção, será menor. Estas curvas estão normalizadas na norma IEC 60269-2.



## Capítulo 4

# Desenvolvimento da ferramenta computacional

O principal objetivo do trabalho era o desenvolvimento de uma ferramenta que auxiliasse os engenheiros no cálculo do dimensionamento dos cabos BT e respetivos caminhos de cabos. Um dos requisitos era a automatização do processo de dimensionamento atualmente seguido pela empresa tornando-o mais eficiente.

Por isso era fundamental que a ferramenta fosse capaz de dimensionar e validar todos os circuitos presentes na instalação, sendo possível a qualquer momento alterar alguma característica da canalização, proteção ou método de instalação, de forma a corresponder às cargas necessárias e condições técnicas de dimensionamento.

### 4.1 - *Software*

A ferramenta foi desenvolvida em Excel devido à flexibilidade e fácil utilização deste *software*. É também o *software* onde foi desenvolvida a ferramenta já utilizada pela empresa servindo assim de ponto de partida para a aplicação pretendida.

Com o Excel foi possível programar na linguagem *Visual Basic For Applications* (VBA) permitindo a criação de funções e macros de forma a automatizar tarefas repetitivas. As capacidades de exposição de dados proporcionadas pelo Excel foram também uma das principais razões para a sua escolha, pois foi possível organizar os dados

e validações de cada circuito de forma extensa na mesma linha, facilitando a acessibilidade e compreensão destes.

## 4.2 - Arquitetura da ferramenta computacional

A arquitetura da ferramenta é formada por três partes que interagem e são dependentes entre si.

A primeira parte é referente aos dados gerais da instalação, onde são escolhidas ou introduzidas diversas informações abrangentes a toda a instalação como as condições ambientais, os parâmetros da rede e do transformador que alimenta a rede BT e características dos condutores.

A segunda parte trata do dimensionamento dos circuitos. São introduzidos os vários parâmetros do circuito, como as cargas, proteção, cabo e método de instalação para depois serem validados pelas várias condições técnicas do dimensionamento.

A terceira parte é referente aos caminhos de cabos. Nesta parte são carregados os dados dos circuitos dimensionados na parte anterior e é atribuído um trajeto e caminhos de cabos que percorre. Através do cálculo da área transversal do cabo e das dimensões dos caminhos é validada a sua taxa de ocupação.

De forma a esquematizar de forma generalizada as etapas funcionais da ferramenta desenvolvida é apresentada a Figura 4.1.

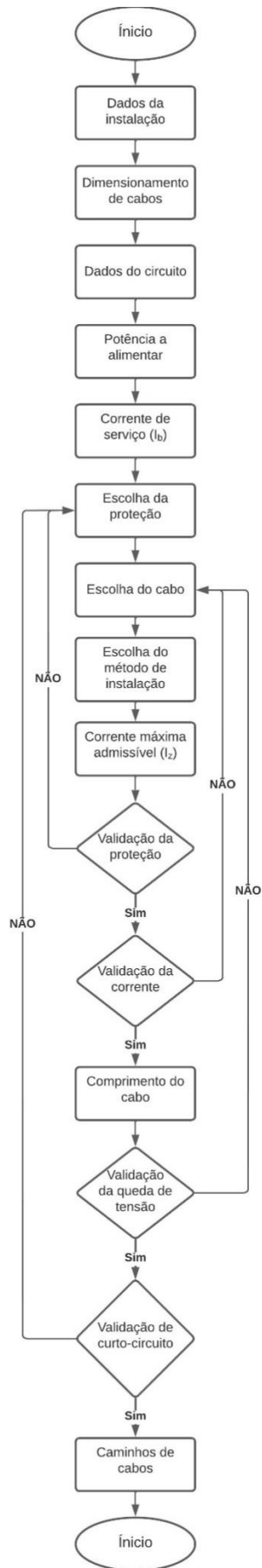


Figura 4.1 - Fluxograma do método de dimensionamento da ferramenta

### 4.3 - Dados da instalação

Como já foi referido, na primeira parte da ferramenta são introduzidos dados gerais da instalação. Esta secção está dividida em quatro partes, ambiente, rede, transformador e condutores.

Na secção Ambiente é possível seleccionar a temperatura do solo, cujas opções encontram-se na primeira coluna da Tabela 3.2. O valor standard é o de 20°C, pois é corresponde ao fator de correção unitário. É possível seleccionar também a resistividade térmica do solo, cujas opções encontram-se na primeira coluna da Tabela 3.3. O valor standard é o de 2.5 K·m/W, pois é corresponde ao fator de correção unitário. Por fim a temperatura do ar cujas opções encontram-se na primeira coluna da Tabela 3.1. O valor standard é o de 30°C, pois é corresponde ao fator de correção unitário.

O que a ferramenta exhibe no ecrã está mostrado na Figura 4.2.

Ambiente		
Temperatura do solo (°C)	Resistividade térmica do solo (K·m/W)	Temperatura do ar (°C)
20 (Standard)	2.5 (Standard)	30 (Standard)

Figura 4.2 - Ferramenta - Dados da instalação - Secção Ambiente

Na secção Rede é possível introduzir os dados da rede, estas informações serão usadas para o cálculo da impedância da rede. A Figura 4.3 apresenta o que é exibido na ferramenta.

Rede			
Tensão (kV)	Frequência (Hz)	Potência curto-circuito [Sc] (MVA)	[R/X] (%)
			0

Figura 4.3 - Ferramenta - Dados da instalação - Secção Rede

Na secção de Transformador são introduzidas as características do transformador, como os níveis de tensão MT e BT, a sua potência e a tensão de curto-circuito, usados para o cálculo da impedância do transformador. A Figura 4.4 apresenta o que é exibido na ferramenta.

Transformador			
Tensão MT (V)	Tensão BT (V)	Potência (kVA)	Tensão de c.c. [Ucc] (%)
			0.00%

Figura 4.4 - Ferramenta - Dados da instalação - Secção Transformador

As duas secções anteriormente referida servem também para a determinação de todas as unidades de base necessárias para a utilização do sistema por unidade nos cálculos das impedâncias e correntes de curto-circuito.

A última secção, denominada Condutores, é escolhida a queda de tensão máxima para a instalação, a alma dos condutores conforme as classes abordadas em 2.1.1 e também é calculado o poder de corte. A Figura 4.4 apresenta o que é exibido na ferramenta.

Condutores		
Queda de tensão (EV)	Alma dos condutores	Poder de corte (kA)
0.00%	-	0.00

Figura 4.5 - Ferramenta - Dados da instalação - Secção Transformador

## 4.4 - Dimensionamento de cabos

Nesta parte é onde ocorre o dimensionamento dos circuitos. Os circuitos são dimensionados individualmente por linha, onde existem determinadas células em que são introduzidos ou seleccionados os dados requisitados e outras efetuam os cálculos e validações automaticamente. Cada linha foi desenvolvida de forma a tornar mais automático e eficiente o dimensionamento.

### 4.4.1 - Botões

Os botões situados no topo da página têm determinadas funções que são fundamentais para a operação desta página.

O primeiro, representado na Figura 4.5, tem a função de criar uma nova linha, ou seja, um novo circuito, para dimensionar. Esta linha possui todas os locais de introdução de dados, escolha de opções, cálculos e funções necessárias à validação do circuito.

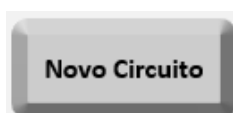
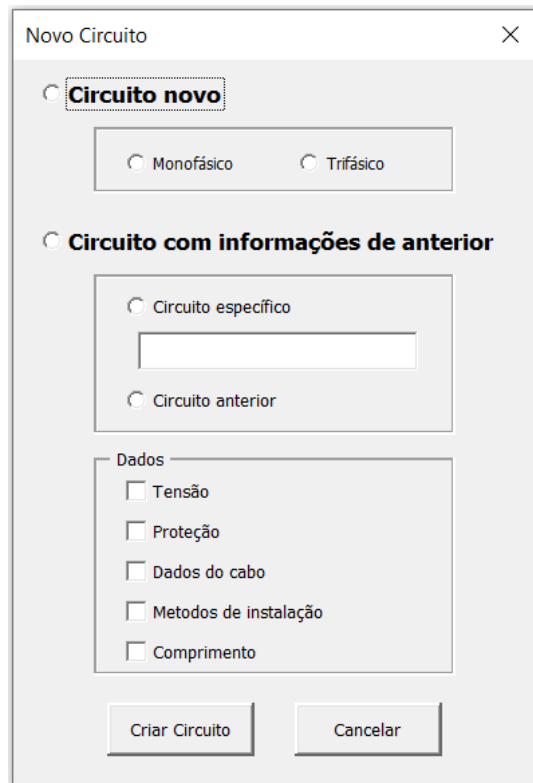


Figura 4.6 - Botão "Novo Circuito" da ferramenta

Após pressionar este botão, surge um formulário que está representado na Figura 4.6. Este formulário permite a criação de um novo circuito, com a opção de criação de um circuito completamente novo, monofásico ou trifásico, ou um circuito similar a algum já existente, caso já tenham sido introduzidos outros circuitos. Na segunda opção é possível escolher um cabo dos já existentes ou o imediatamente anterior, assim como os dados que o utilizador pretende que sejam os mesmos.



Novo Circuito

**Circuito novo**

Monofásico  Trifásico

**Circuito com informações de anterior**

Circuito específico

Circuito anterior

Dados

Tensão

Proteção

Dados do cabo

Metodos de instalação

Comprimento

Figura 4.7 - Formulário do botão “Novo Circuito” da ferramenta

O segundo botão, representado na Figura 4.7, tem a função de apagar uma linha, ou circuito, que já tenha sido introduzida na folha. Após pressionado o botão, surge um formulário, representado na Figura 4.8, que tem as opções de apagar o último circuito introduzido ou um circuito específico, através da introdução da sua identificação.



Figura 4.8 - Botão “Apagar Circuito” da ferramenta

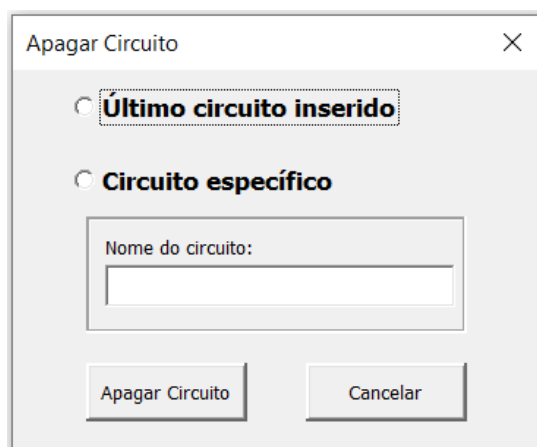


Figura 4.9 - Formulário do botão “Apagar Circuito” da ferramenta

O terceiro botão, representado na Figura 4.9, serve para exportar todos os resultados e valores para um ficheiro pdf.



Figura 4.10 - Botão “Imprimir” da ferramenta

Os dois seguintes botões, representados na figura 4.10, servem apenas para navegação na ferramenta, direcionando para a página de “Dados da Instalação” ou para a página de “Caminhos de Cabos” quando pressionados.



Figura 4.11 - Botões de navegação da ferramenta

#### 4.4.2 - Circuito

Nesta secção são introduzidas características do circuito que vai ser dimensionado. É fornecida informação sobre a origem e destino do circuito, como também uma identificação, que deverá ser única para cada circuito. O tipo de circuito escolhido, monofásico ou trifásico, assume um número de polos e tensão composta habituais para cada opção, com a possibilidade de serem alterados pelo utilizador. A Figura 4.11 apresenta o que é exibido na ferramenta quando é adicionado um circuito trifásico.

Circuito			Tipo de circuito	Polos	Tensão (V)
Origem	Destino	Identificação			
*Origem*	*Destino*	*Circuito*	Trifásico	3	400

Figura 4.12 - Dados do circuito na ferramenta

#### 4.4.3 - Potência

Nesta secção a carga que o circuito vai ter de alimentar, para isso, devem ser introduzidos vários dados para analisar.

Em primeiro lugar são escolhidas as fases que serão utilizadas no circuito. No caso de um circuito monofásico, apenas uma das fases pode ser utilizada visto este só possuir um condutor de fase, entretanto num circuito trifásico pode ser escolhida qualquer combinação possível das três fases.

Depois da seleção das fases é introduzida a potência respetiva, em W, assim como os fatores de simultaneidade e o fator de potência,  $\cos \varphi$ . Na falta de dados para estes dois fatores, eles devem permanecer unitários.

Visto isto, é calculada a potência a alimentar pelo circuito, em VA, através da soma das potências das fases utilizadas multiplicada pelo fator de potência.

A Figura 4.12 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta parte.

Fases a usar	Potência (W)			F. Simul.	F. Potên. ( $\cos \varphi$ )	Potên. a alimentar (VA)
	Fase 1 (L1)	Fase 2 (L2)	Fase 3 (L3)			
-	-	-	-	1	1	0.00

Figura 4.13 - Dados da potência na ferramenta

#### 4.4.4 - Corrente de serviço

Nesta secção é determinada a corrente de serviço do circuito. Através do cálculo abordado em 3.2 resulta a intensidade de corrente que percorre cada condutor de fase do circuito. A Figura 4.13 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta parte.

Corrente de serviço (A)
$I_B$
0.00

Figura 4.14 - Valor da corrente de serviço na ferramenta

#### 4.4.5 - Proteção

Esta é a secção onde o utilizador determina a proteção que é utilizada no circuito. É possível escolher o tipo de proteção, disjuntor ou fusível, e consoante o tipo escolhido os valores de corrente nominal  $I_n$  e as curvas de disparo alteram. Os valores da corrente nominal para os disjuntores estão na Tabela 3.5 e para os fusíveis na Tabela 3.6 e as curvas de disparo são as abordadas em 3.7.2. A Figura 4.14 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Proteção		
Tipo de proteção	Corrente nominal (A) $I_n$	Curva de disparo
-	-	-

Figura 4.15 - Dados da proteção do circuito na ferramenta

#### 4.4.6 - Cabo

Nesta secção são escolhidas as características do cabo utilizado no circuito. Cada característica possui uma lista de opções para que seja possível o utilizador o cabo mais apropriado. A Figura 4.15 apresenta as várias opções exibidas na ferramenta nesta secção.

Cabo									
Condutor	Isolamento	Tipo	Nº cond. carreg.	Secção (mm <sup>2</sup> )	Nº passagens cond. fase	Neutro	Secção N (mm <sup>2</sup> )	Terra	Designação (mm <sup>2</sup> )
-	-	-	-	0	1	-	0	-	-

Figura 4.16 - Dados do cabo na ferramenta

O cabo pode ter a alma condutora de cobre ou alumínio, o isolamento pode ser em PVC ou XLPE e o tipo pode ser mono-condutor ou multi-condutor. Conforme a alma condutora, a secção apresenta os valores da Tabela 2.1.

A célula do número de passagens do condutor fase é apenas aplicado a cabos multi-condutores. Foi um requisito colocado pela empresa pela necessidade de dimensionar circuitos onde se torna mais económico usar várias passagens da mesma secção do que aumentar a secção para alcançar a corrente máxima admissível desejada.

Na célula de neutro é possível escolher a presença do condutor neutro ou não, mas também se este possui a mesma secção do condutor fase ou é reduzido, a secções de neutro reduzidas estão na Tabela 2.3. Após a escolha, secção do neutro é determinada automaticamente.

Na célula de terra é escolhida a presença do condutor de proteção, ou condutor de terra, e a sua secção é igual à do condutor neutro.

A designação é um processo automático que analisa as características introduzidas pelo utilizador e resulta uma designação compacta do cabo, conforme abordado em 2.1.4, do número de condutores e secções respetivas.

#### 4.4.7 - Método de instalação

Nesta secção o utilizador seleciona o método de instalação do circuito. As opções estão referidas em 3.3.1, assim como o método de atribuição da letra referente ao método de instalação inserido.

Porém existe uma exceção, quando na instalação é escolhida a opção “Caminhos de cabos”, as opções da situação são alteradas e a célula de orientação é desbloqueada, pois apenas é útil para esta instalação. Isto acontece para tornar mais específica a seleção da letra do método e consequentemente a corrente máxima admissível. A Figura 4.16 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Método de instalação			
Instalação	Situação	Orientação	Letra
-	-	-	-

Figura 4.17 - Método de instalação do circuito na ferramenta

#### 4.4.8 - Corrente máxima admissível

Nesta secção é determinada a corrente máxima admissível do cabo, conforme as informações do cabo introduzidas anteriormente e a letra do método de instalação determinado na secção anterior. O método utilizado está descrito em 3.3.1.

Na célula do fator de agrupamento o utilizador deve introduzir o fator de correção de agrupamento, caso exista, analisando as tabelas referidas em 3.3.2.4 de forma a obter um valor de corrente máxima admissível mais adequado à situação em que os cabos se encontram. No caso de falta de dados, este valor deve permanecer unitário. . A Figura 4.17 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Corrente máxima do cabo (A) $I_z$	Fator de agrupamento	Corrente máxima corrigida (A) $I_z'$
0	1	0

Figura 4.18 - Corrente máxima admissível do circuito na ferramenta

#### 4.4.9 - Verificação do cabo

Nesta secção são validadas as condições de aquecimento e de proteção contra sobrecargas. Estas condições e respetivas expressões foram descritas em 3.4 e em 3.6, respetivamente.

Quando existe algum erro na introdução dos valores pelo utilizado nas secções anteriores o resultado da validação devolve “ERRO”. Quando a condição é validada, o resultado é “SIM”, caso não seja o resultado é “NÃO”. Neste último caso, o utilizador deverá ajustar a proteção do circuito ou as características do cabo de forma a validar tal condição. A Figura 4.18 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Verificação do cabo			
$I_B \leq I_Z'$	$I_B \leq I_N$	$I_N \leq I_Z'$	$I_2 \leq 1,45 \times I_Z'$
ERRO	ERRO	ERRO	ERRO

Figura 4.19 - Verificação do cabo na ferramenta

#### 4.4.10 - Comprimento

Nesta secção o utilizador introduz o comprimento do circuito, em metros. A Figura 4.19 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Comprimento (m)
0

Figura 4.20 - Comprimento do circuito na ferramenta

#### 4.4.11 - Resistência e reatância

Nesta secção é determinada automaticamente a resistência linear do condutor de fase e do condutor de neutro, caso este esteja presente. Estes valores estão referenciados na Tabela 3.4.

Com este valor presente de seguida são calculadas as resistências á temperatura de funcionamento e máxima do isolamento, que resultam da correção da resistência linear a 20°C utilizando a expressão 3.7.

O valor da reactância linear, conforme o abordado em 3.5.1.2, toma o valor de 0.8  $\Omega$ /km. O utilizador pode alterar este valor para um mais preciso caso pretenda.

A Figura 4.20 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Resistência fase 20°C ( $\Omega$ /km)	Resistência neutro 20°C ( $\Omega$ /km)	Resistência fase t. func. ( $\Omega$ /km)	Resistência neutro t. func. ( $\Omega$ /km)	Resistência fase t. final ( $\Omega$ /km)	Resistência neutro t. final ( $\Omega$ /km)	Reatância ( $\Omega$ /km)
-	-	-	-	-	-	0.08

Figura 4.21 - Resistência e reatância na ferramenta

#### 4.4.12 - Queda de tensão

Nesta secção é calculada a queda de tensão do circuito. Para isto, a expressão 3.5 apresenta a fórmula de cálculo para a queda de tensão para circuitos monofásicos e trifásicos equilibrados e a expressão 3.6 a fórmula de cálculo para circuitos trifásicos desequilibrados. A queda de tensão em percentagem é calculada pela queda de tensão sobre a tensão do circuito.

No caso de o circuito que estiver a ser dimensionado se encontrar a jusante de outro circuito que já está dimensionado na ferramenta, a queda de tensão total irá calcular o somatório da queda de tensão dos dois circuitos, pois este será o valor correto da queda de tensão desde a origem.

A Figura 4.21 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Queda de tensão (V)	Queda de tensão (%)	Queda de tensão total (%)
0	0.00%	0.00%

Figura 4.22 - Queda de tensão na ferramenta

#### 4.4.13 - Verificação da queda de tensão

Nesta secção é verificada a condição de queda de tensão, como referido em 3.5. A expressão utilizada para esta validação é a 3.4.

Quando existe algum erro na introdução dos valores pelo utilizado nas secções anteriores o resultado da validação devolve “ERRO”. Quando a condição é validada, o resultado é “SIM”, caso não seja o resultado é “NÃO”. Neste último caso, o utilizador deverá ajustar as características do cabo de forma a validar tal condição.

A Figura 4.22 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Verificação da queda de tensão
ERRO

Figura 4.23 - Verificação da queda de tensão na ferramenta

#### 4.4.14 - Impedância equivalente

Nesta secção é calculada a impedância equivalente do circuito, considerando as impedâncias da rede, do transformador e as do cabo.

A Figura 4.23 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

$Z_{eq}$ ( $\Omega$ )
0.00000

Figura 4.24 - Impedância equivalente na ferramenta

#### 4.4.15 - Corrente de curto-circuito mínima e máxima

Nesta secção são calculadas as correntes de curto-circuito mínima e máxima do circuito. A forma de cálculo para ambas correntes está demonstrada na Tabela 3.8.

A Figura 4.24 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

$I_{cc\_min}$ (A)	$I_{cc\_max}$ (A)
0.00	0.00

Figura 4.25 - Corrente de curto-circuito mínima e máxima na ferramenta

#### 4.4.16 - Tempo de fadiga térmica e tempo de proteção

Nesta secção é calculado o tempo de fadiga térmica e determinado o tempo de atuação da proteção.

Com os valores das correntes de curto-circuitos já calculados, utilizando a expressão 3.12 é possível calcular o tempo de fadiga térmica da canalização.

O tempo de atuação da proteção é determinado conforme descrito em 3.7.2.

A Figura 4.25 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Fadiga térmica	Tempo proteção
$t_{FT}$ (s)	$t_p$ (s)
0.0000	0.000

Figura 4.26 - Tempo de fadiga térmica e tempo de proteção na ferramenta

#### 4.4.17 - Verificação de curto-circuitos

Nesta secção são verificadas as condições de proteção de curto-circuitos, como referido em 3.7. As expressões utilizadas para estas validações são 3.10 e 3.11.

Quando existe algum erro na introdução dos valores pelo utilizado nas secções anteriores o resultado da validação devolve “ERRO”. Quando a condição é validada, o resultado é “SIM”, caso não seja o resultado é “NÃO”. Neste último caso, o utilizador deverá ajustar as características do cabo de forma a validar tal condição.

A Figura 4.26 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Verificação curto-circuito	
$t_p < t_{FT}$	$t_p \leq 5s$
ERRO	ERRO

Figura 4.27 - Verificação de curto-circuitos na ferramenta

### 4.5 - Dimensionamento de caminhos de cabos

Depois de corretamente dimensionados os circuitos e respetivos cabos, entra o dimensionamento de caminhos de cabos. Este dimensionamento passa por atribuir aos cabos o trajeto determinado em projeto e a cada trajeto o tipo de canalização respetiva. Através do cálculo da área transversal do cabo e da área útil da canalização, é possível determinar a taxa de ocupação da canalização e verificar que esta não se encontra demasiado carregada

#### 4.5.1 - Botões para os circuitos

Os botões situados no topo esquerdo da página têm determinadas funções que são fundamentais para a operação desta página.

Existem três botões que operam com os circuitos já dimensionados, estes estão representados na Figura 4.27.

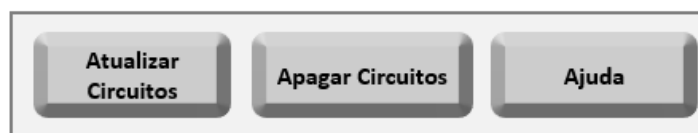


Figura 4.28 - Botões para os circuitos na ferramenta

O botão “Atualizar Circuitos” tem a função de carregar os circuitos dimensionados na parte anterior para este novo dimensionamento, mas apenas os dados mais relevantes como a origem, destino e identificação do circuito e o condutor, isolamento, tipo e designação do cabo.

Automaticamente, a ferramenta determina o diâmetro exterior e calcula a área transversal do cabo. Caso o cabo não se encontre na base de dados da ferramenta, o utilizador deverá introduzir o valor do diâmetro exterior do cabo.

O botão “Apagar Circuitos” tem a função de apagar todos os circuitos presentes no dimensionamento e o botão “Ajuda” possui um formulário com vários tópicos de forma a ajudar o utilizador a proceder corretamente quando opera neste dimensionamento.

#### 4.5.1 - Botões para os caminhos

Os botões situados no topo direito da página têm funções semelhantes aos botões anteriores. Existem três botões que operam com os caminhos de cabos, estes estão representados na Figura 4.28.

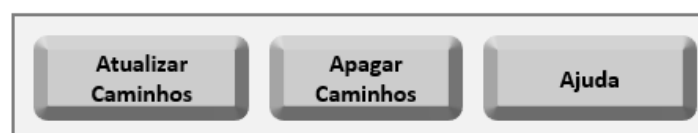


Figura 4.29 - Botões para os caminhos na ferramenta

O botão “Atualizar Caminhos” tem a função de analisar a identificação dos caminhos de cabos, ou trajeto do circuito, inseridos pelo utilizador, discriminar cada parte do trajeto e apresentar um por linha para ser atribuído um tipo de canalização.

O botão “Apagar Circuitos” tem a função de apagar todos os caminhos presentes no dimensionamento e o botão “Ajuda” possui um formulário com vários tópicos de forma a ajudar o utilizador a proceder corretamente quando opera neste dimensionamento.

### 4.5.3 - Diâmetro exterior e área transversal

A secção de diâmetro exterior determina o diâmetro exterior do cabo em função das características do cabo presentes na linha através da análise de um base de dados de cabos presente na ferramenta. Se o cabo não existir nessa base de dados, o utilizador deverá introduzir o este valor.

A área transversal do cabo é calculada pela expressão 4.1.

$$\text{Área transversal} = \frac{\text{Diâmetro exterior}}{2} \times \pi^2 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

A Figura 4.29 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Cabo					
Condutor	Isolamento	Tipo	Designação (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro exterior (mm)	Área transversal (cm <sup>2</sup> )

Figura 4.30 - Diâmetro exterior e área transversal na ferramenta

### 4.5.4 - Identificação dos caminhos de cabos

Nesta secção o utilizador deve introduzir o trajeto percorrido pelo circuito, discriminando todas as canalizações que o circuito percorre.

A Figura 4.30 apresenta o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Caminhos de cabos
Identificação

Figura 4.31 - Identificação dos caminhos de cabos na ferramenta

### 4.5.5 - Caminhos de cabos

Nesta secção estão presentes os caminhos de cabos que foram discriminados quando o botão “Atualizar Caminhos” foi pressionado. Nas células seguintes é atribuído o tipo de canalização, como descritas em 2.2, e as respetivas dimensões.

A área útil é calculada em função das dimensões da canalização, é utilizada a expressão 4.2 para canalizações circulares e a expressão 4.3 para os outros tipos.

$$\text{Área útil} = \left( \frac{\text{Diâmetro}}{2} - \text{Espessura} \right) \times \pi^2 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Área útil} &= (\text{Altura} - \text{Espessura}) \\ &\times (\text{Largura} - \text{Espessura}) \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

O número de circuitos é determinado pelo número de cabos que percorre a canalização em questão.

A área total de circuitos calcula o somatório das áreas transversais dos cabos nessa canalização.

A taxa de ocupação é o valor em percentagem do valor da área transversal dos circuitos e a área útil da canalização. Este valor deve ser inferior a 70%.

A Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 apresentam o que é exibido na ferramenta nesta secção.

Caminhos de cabos		
Identificação	Tipo de canalização	Extra

Figura 4.32 - Identificação da canalização na ferramenta

Caminhos de cabos			
Dimensões: Altura (mm)	Dimensões: Largura (mm)	Dimensões: Diâmetro (mm)	Dimensões: Espessura (mm)

Figura 4.33 - Dimensões da canalização na ferramenta

Caminhos de cabos			
Área útil (cm <sup>2</sup> )	Número de circuitos	Área total circuitos (cm <sup>2</sup> )	Taxa de ocupação (%)

Figura 4.34 - Áreas, número de circuitos e taxa de ocupação da canalização na ferramenta



## Capítulo 5

### Exemplo de cálculo

No presente capítulo é exemplificada a utilização da aplicação num caso real de dimensionamento de cabos BT e caminhos de cabos. O caso consiste no dimensionamento dos vários circuitos provenientes de um QGBT para as diversas cargas a alimentar e derivações para outros quadros parciais. Serão apresentados todos os dados iniciais e cálculos utilizados pela ferramenta para o correto dimensionamento destes mesmos circuitos.

#### 5.1 - Características da instalação

Nesta secção serão apresentados os dados da instalação, que serão introduzidos pelo utilizador e servirão como base para certos cálculos feitos pela ferramenta no dimensionamento. Neste caso prático serão utilizadas as seguintes características:

Ambiente:

- Temperatura do solo ..... 20 °C
- Resistividade térmica do solo ..... 2.5 K.m/W
- Temperatura do ar..... 30 °C

Ambiente		
Temperatura do solo (°C)	Resistividade térmica do solo (K·m/W)	Temperatura do ar (°C)
20 (Standard)	2.5 (Standard)	30 (Standard)

Figura 5.1 - Características do ambiente no caso prático

Rede:

- Tensão ..... 15 kV
- Frequência ..... 50 Hz
- Potência de curto-circuito ..... 496 MVA
- R/X ..... 1%

Rede			
Tensão (kV)	Frequência (Hz)	Potência curto-circuito [Sc] (MVA)	[R/X] (%)
15	50	469	1

Figura 5.2 - Características da rede no caso prático

Transformador:

- Tensão MT ..... 15000 V
- Tensão BT ..... 400 V
- Potência ..... 630 kVA
- Tensão de curto-circuito ..... 4%

Transformador			
Tensão MT (V)	Tensão BT (V)	Potência (kVA)	Tensão de c.c. [Ucc] (%)
15000	400	630	4.00%

Figura 5.3 - Características do transformador no caso prático

Condutores:

- Queda de tensão ..... 5%
- Alma dos condutores ..... Maciça Multifilar
- Poder de corte ..... 21.92 kA

Condutores		
Queda de tensão (εV)	Alma dos condutores	Poder de corte (kA)
5.00%	Maciça Multifilar	21.92

Figura 5.4 - Características dos condutores no caso prático

## 5.2 - Dimensionamento dos cabos

Depois de definidos os parâmetros da instalação, o utilizador deve passar para a parte seguinte da ferramenta, onde vai dimensionar todos dos circuitos que necessita na sua instalação.

Neste caso prático, serão dimensionados os circuitos provenientes de um QGBT. Os circuitos passam por duas alimentações para duas máquinas trifásicas, três circuitos de iluminação monofásicos e uma derivação para um quadro parcial da instalação.

As características das máquinas a alimentar são as seguintes:

Máquina 1:

- Tensão ..... 400 V
- Frequência ..... 50 Hz
- Potência ..... 45 kW
- Fator de potência ( $\cos\phi$ ) ..... 0.83
- Distância da máquina ao quadro ..... 30 m

Máquina 2:

- Tensão ..... 400 V
- Frequência ..... 50 Hz
- Potência ..... 7.5 kW
- Fator de potência ( $\cos\phi$ ) ..... 0.9
- Distância da máquina ao quadro ..... 25 m

Os circuitos de iluminação serão constituídos por dez luminárias cada, com as seguintes características:

- Tensão ..... 230 V
- Frequência ..... 50 Hz
- Potência ..... 100 W
- Fator de potência ( $\cos\phi$ ) ..... 0.95
- Distância da máquina ao quadro ..... 50 m

O quadro a alimentar vai ser dimensionado para uma potência de 15kW, trifásico e instalado a 75m do QGBT.

Inicialmente, o utilizador cria as linhas referentes ao número de circuitos que pretende dimensionar. De seguida, introduz individualmente toda a informação que possui sobre o circuito em questão como a origem e o destino do mesmo e atribui uma

identificação, insere também o tipo de alimentação e a tensão. Na figura 5.5 é possível observar essas informações referentes ao caso prático inseridas na ferramenta.

O utilizador tem também a opção de escolher quais fases do circuito vai utilizar, esta opção permite uma melhor distribuição das cargas pelas fases de forma que nenhuma fique sobrecarregada. No dimensionamento, a ferramenta vai escolher a fase mais carregada, pois representa o caso mais desfavorável.

Na figura 5.6 foram introduzidos os valores de fator de potência e a ferramenta calculou os valores de potência a alimentar e a corrente de serviço de cada circuito, essencial para os passos seguintes do dimensionamento. Com este valor de corrente é possível escolher a proteção do circuito, onde a corrente nominal da proteção deve ser superior à corrente de serviço do circuito. As características restantes da proteção serão escolhidas em função da carga a alimentar pelo circuito.

Circuito			Tipo de circuito	Polos	Tensão (V)	Fases a usar	Potência (W)		
Origem	Destino	Identificação					Fase 1 (L1)	Fase 2 (L2)	Fase 3 (L3)
QGBT	Máquina 1	Circuito 1	Trifásico	3	400	L1 - L2 - L3	45000	45000	45000
QGBT	Máquina 2	Circuito 2	Trifásico	3	400	L1 - L2 - L3	7500	7500	7500
QGBT	Iluminação 1	Iluminação 1	Monofásico	2	230	L1	1000	-	-
QGBT	Iluminação 2	Iluminação 2	Monofásico	2	230	L2	-	1000	-
QGBT	Iluminação 3	Iluminação 3	Monofásico	2	230	L3	-	-	1000
QGBT	Quadro Parcial	Quadro Parcial	Trifásico	3	400	L1 - L2 - L3	15000	15000	15000

Figura 5.5 - Informações inseridas na ferramenta dos circuitos do caso prático

F. Simul.	F. Potên. ( $\cos\phi$ )	Potên. a alimentar (VA)	Corrente de serviço (A) $I_B$	Proteção		
				Tipo de proteção	Corrente nominal (A) $I_N$	Curva de disparo
1	0.83	112050.00	78.26	Disjuntor	80	D
1	0.9	20250.00	12.03	Disjuntor	16	D
1	0.95	950.00	4.58	Disjuntor	6	C
1	0.95	950.00	4.58	Disjuntor	6	C
1	0.95	950.00	4.58	Disjuntor	6	C
1	1	45000.00	21.65	Disjuntor	25	C

Figura 5.6 - Informações relativas à potência e proteção dos circuitos no caso prático

Na figura 5.7 estão representados todos os cabos escolhidos para os circuitos em questão. As características destes cabos são definidas pelo projetista de forma a cumprirem todos os requisitos do circuito. Assim como os métodos de instalação, presentes na figura 5.8, onde deve ser indicado trajeto percorrido que representa o valor mais baixo da corrente máxima admissível do cabo.

As validações do cabo estão representadas na figura 5.9, e caso alguma não seja cumprida, o utilizador tem a possibilidade de alterar qualquer característica anteriormente indicada de forma que esta seja validada.

Cabo									
Condutor	Isolamento	Tipo	Nº cond. carreg.	Secção (mm <sup>2</sup> )	Nº passagens cond. fase	Neutro	Secção N (mm <sup>2</sup> )	Terra	Designação (mm <sup>2</sup> )
Alumínio	XLPE	Multi-condutor	3	35	1	Sim (Reduzido)	16	Sim	3 x 35+2G16
Cobre	XLPE	Multi-condutor	3	2.5	1	Sim	2.5	Sim	5G2.5
Cobre	PVC	Multi-condutor	2	2.5	1	Sim	2.5	Sim	3G2.5
Cobre	PVC	Multi-condutor	2	2.5	1	Sim	2.5	Sim	3G2.5
Cobre	PVC	Multi-condutor	2	2.5	1	Sim	2.5	Sim	3G2.5
Cobre	XLPE	Multi-condutor	3	6	1	Sim	6	Não	4 x 6

Figura 5.7 - Informações relativas aos cabos dos circuitos no caso prático

Método de instalação				Corrente máxima do cabo (A) $I_2$	Fator de agrupamento	Corrente máxima corrigida (A) $I_2'$
Instalação	Situação	Orientação	Letra			
Caminhos de cabos	Perfurados	Sem afastamento	E2	120	0.8	96
Caminhos de cabos	Perfurados	Sem afastamento	E2	32	0.8	25.6
Condutas circulares	À vista	-	B2	23	1	23
Condutas circulares	Ocos de construção	-	B2	23	1	23
Condutas circulares	Embebidas	-	A2	18.5	1	18.5
Condutas circulares	Enterradas	-	D2	49	1	49

Figura 5.8 - Informações relativas aos métodos de instalação e correntes no caso prático

Verificação do cabo			
$I_B \leq I_2'$	$I_B \leq I_N$	$I_N \leq I_2'$	$I_2 \leq 1,45 \times I_2'$
SIM	SIM	SIM	SIM
SIM	SIM	SIM	SIM
SIM	SIM	SIM	SIM
SIM	SIM	SIM	SIM
SIM	SIM	SIM	SIM
SIM	SIM	SIM	SIM

Figura 5.9 - Validações dos cabos no caso prático

Depois de inserido o comprimento do circuito, a ferramenta determina os valores de resistência dos condutores para de seguida calcular as quedas de tensão e as validar conforme o valor definido nas características da instalação, como é possível observar na figura 5.9.

De forma automática a ferramenta calcula a impedância equivalente do circuito, as correntes de curto-circuito necessárias e os tempos de fadiga térmica e atuação da proteção de forma a validar as condições de curto-circuito, como pode ser visto na figura 5.10.

Comprimento (m)	Resistência fase 20°C (Ω/km)	Resistência neutro 20°C (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Queda de tensão (V)	Queda de tensão (%)	Queda de tensão total (%)	Verificação da queda de tensão
30	0.868	1.9100	0.08	2.24600115	0.56%	0.56%	SIM
35	7.41	7.4100	0.08	3.59851284	0.90%	0.90%	SIM
50	7.41	7.4100	0.08	3.8694651	1.68%	1.68%	SIM
50	7.41	7.4100	0.08	3.8694651	1.68%	1.68%	SIM
50	7.41	7.4100	0.08	3.8694651	1.68%	1.68%	SIM
75	3.08	3.0800	0.08	6.38415525	1.60%	1.60%	SIM

Figura 5.10 - Comprimento e validações das quedas de tensão no caso prático

$Z_{eq}$ (Ω)	$I_{cc\_min}$ (A)	$I_{cc\_max}$ (A)	Fadiga térmica $t_{FT}$ (s)	Tempo proteção $t_p$ (s)	Verificação curto-circuito	
					$t_p < t_{FT}$	$t_p \leq 5s$
0.02908	1398.03	2725.31	1.1573	1.000	SIM	SIM
0.25969	221.59	445.01	2.6028	1.000	SIM	SIM
0.37078	109.61	179.15	6.8800	0.010	SIM	SIM
0.37078	109.61	179.15	6.8800	0.010	SIM	SIM
0.37078	109.61	179.15	6.8800	0.010	SIM	SIM
0.23159	248.74	499.28	11.8982	0.010	SIM	SIM

Figura 5.11 -Validações dos curto-circuitos no caso prático

Com os circuitos a dimensionar inseridos e após todas as validações estarem verificadas dá-se por concluído o dimensionamento dos circuitos da instalação, onde o utilizador passa para a etapa seguinte.

### 5.3 - Caminhos de cabos

Com os circuitos definidos e corretamente dimensionados, a ferramenta permite ao utilizador atualizar nesta página todos esses circuitos, onde de seguida calcula o diâmetro exterior e a área transversal do cabo, representado na figura 5.11.

Na secção “Identificação” o utilizador insere todos os trajetos percorridos pelo cabo, separando os vários trajetos por um “-”.

Cabo						Caminhos de cabos
Condutor	Isolamento	Tipo	Designação (mm <sup>2</sup> )	Diametro exterior (mm)	Área transversal (cm <sup>2</sup> )	Identificação
Alumínio	XLPE	Multi-condutor	3 x 35+2G16	27.5	7.5625	Calha_1-Calha_2
Cobre	XLPE	Multi-condutor	5G2.5	12.5	1.5625	Calha_1-Calha_3
Cobre	PVC	Multi-condutor	3G2.5	11	1.21	Tubo_1
Cobre	PVC	Multi-condutor	3G2.5	11	1.21	Tubo_2
Cobre	PVC	Multi-condutor	3G2.5	11	1.21	Tubo_3
Cobre	XLPE	Multi-condutor	4 x 6	14	1.96	Conduta_1

Figura 5.12 - Listagem dos circuitos e definição dos trajetos do caso prático

Com os trajetos definidos, a ferramenta discrimina cada um deles e dá a possibilidade ao utilizador de caracterizar o trajeto, assim como as dimensões do mesmo, como representado na figura 5.12.

Com esses dados a ferramenta calcula a área útil da canalização e a área ocupada pelos circuitos que percorrem a mesma. Com esses valores a ferramenta fornece uma validação da taxa de ocupação da canalização, de forma que o utilizador possa confirmar se esta possui as dimensões corretas para a instalação.

Caminhos de cabos						
Identificação	Tipo de canalização	Extra	Dimensões: Altura (mm)	Dimensões: Largura (mm)	Dimensões: Diâmetro (mm)	Dimensões: Espessura (mm)
Calha_1	Caminhos de cabos	Em chapa	60	100	-	-
Calha_2	Caminhos de cabos	Em chapa	35	50	-	-
Calha_3	Caminhos de cabos	Em chapa	35	50	-	-
Conduta_1	Condutas circulares	Tubos	-	-	25	-
Tubo_1	Condutas circulares	Tubos	-	-	20	-
Tubo_2	Condutas circulares	Tubos	-	-	20	-
Tubo_3	Condutas circulares	Tubos	-	-	20	-

Figura 5.13 - Listagem dos trajetos e respetivas dimensões do caso prático

Área útil (cm <sup>2</sup> )	Número de circuitos	Área total circuitos (cm <sup>2</sup> )	Taxa de ocupação (%)
60	2	9.125	15.21%
17.5	1	7.5625	43.21%
17.5	1	1.5625	8.93%
4.90873852	1	1.96	39.93%
3.14159265	1	1.21	38.52%
3.14159265	1	1.21	38.52%
3.14159265	1	1.21	38.52%

Figura 5.14 - Validação da taxa de ocupação dos trajetos do caso prático



## Capítulo 6

# Conclusões e perspectivas de desenvolvimento

### 6.1 Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado o processo de dimensionamento de cabos BT e de caminhos de cabos, com o objetivo final de criar e desenvolver uma ferramenta computacional que pudesse substituir a aplicação em *Excel* utilizada atualmente pela empresa para o efeito. Esta ferramenta tinha o principal objetivo de automatizar a pesquisa de tabelas de dados e o cálculo inerente ao dimensionamento referido. No decorrer da realização do trabalho, o principal objetivo foi a automatização do processo de dimensionamento através do desenvolvimento de uma aplicação computacional de fácil acesso, intuitiva e flexível, na qual fosse possível a sua atualização em caso de eventuais alterações de parâmetros, normas em vigor e componentes a dimensionar. Estes objetivos foram alcançados uma vez que a ferramenta permite o dimensionamento de cabos com diferentes tipos de isolamento e modos de instalação, assim como os respetivos caminhos de cabos.

Numa fase inicial foi apresentada uma síntese sobre os cabos de baixa tensão, onde são expostos vários conceitos e características técnicas, assim como uma apresentação das várias canalizações e suas características. Depois, foi apresentada a formalização do algoritmo de dimensionamento de cabos de baixa tensão, com base nas normas IEC aplicáveis.

De seguida, foi descrita em pormenor uma ferramenta computacional, foi exposto todo processo de cálculo e a sua implementação na ferramenta através de um fluxograma representativo do algoritmo implementado.

A automatização da pesquisa das correntes máximas admissíveis e das resistências lineares através das características dos cabos e do método de instalação respetivo foi uma das principais atualizações à aplicação utilizada pela empresa. Como a ferramenta possui todos os métodos de cálculo, tabelas e valores normalizados para o dimensionamento torna fácil ao utilizador a pesquisa de qualquer informação referente a este tema.

A facilidade de exposição e alteração dos parâmetros dos circuitos, de forma a garantir todas as validações necessárias da instalação é das grandes vantagens da ferramenta, assim como a possibilidade de exportação dos resultados diretamente para o projeto, poupando tempo ao projetista que o está a desenvolver.

## **6.2 Perspetivas de desenvolvimento**

Apesar de quase todos os processos de dimensionamento terem sido simplificados e automatizados, existem áreas onde a ferramenta pode ser melhorada.

Introduzir mais dados nas curvas de disparo das proteções e uma análise mais aperfeiçoada destas curvas, de forma a obter um tempo de atuação da proteção mais preciso.

Uma secção importante a melhorar seria na escolha do fator de agrupamento indicado para o circuito.

A realização de uma estimativa dos materiais, cabos e caminhos de cabos, utilizados na instalação.

Por fim, seria importante existir a possibilidade de exportação de um relatório com os resultados dos cálculos realizados.

# Referências

- [1] J. Neves dos Santos, *Condutores e cabos de energia*, 2005.
- [2] *Conductors of insulated cables*, IEC 60228, 2004
- [3] *Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão*, Portaria nº949-A, 2006
- [4] J. P. T. Saraiva, *Dimensionamento e Protecção de Canalizações Eléctricas em Baixa Tensão*, 2000.
- [5] *Electrical Installations of Buildings Part 2*, IEC 60364-2-21, January 1993
- [6] ABB, *Electric Installation Handbook, Vol 2*, 2004
- [7] *Dimensionamento e protecção de canalizações eléctricas (BT)*, IELE, MIEEC FEUP
- [8] J. Neves dos Santos, *Tabelas, Regras e Dados Diversos*, 2009.
- [9] *ELECTRICAL ACCESSORIES - CIRCUIT-BREAKERS FOR OVERCURRENT PROTECTION FOR HOUSEHOLD AND SIMILAR INSTALLATIONS - PART 1: CIRCUIT-BREAKERS FOR A.C. OPERATION*, IEC 60898-1, 2019
- [10] *Low-voltage fuses - Part 2: Supplementary requirements for fuses for use by authorized persons (fuses mainly for industrial application)*, IEC 60269-2, 2016