

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo
de múltiplo curto-circuito em múltiplos
barramentos**

João Manuel Brunhoso Bebiano

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

Orientador: Professor Doutor José Eduardo Roque Neves dos Santos

Outubro 2022

© João Manuel Brunhoso Bebiano, 2022

Resumo

Este documento corresponde ao desenvolvimento da dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Major Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em parceria com a *QUADRANTE Engenharia e Consultoria S.A.*

Teve como tema fundamental o cálculo das correntes de curto-circuito, com o objetivo de permitir ao utilizador determinar os valores das mesmas, esperadas nos barramentos de uma dada instalação, com vista ao auxílio da execução de projetos de engenharia.

Um curto-circuito surge na ocorrência de um defeito, podendo apresentar consequências prejudiciais para a respetiva instalação, bem como todos os equipamentos e acessórios que a constituem. Deste modo, uma correta determinação das correntes de curto-circuito é uma mais-valia para o projetista e para a instalação.

Esta ferramenta foi desenvolvida em *Microsoft Office Excel* através da incorporação da linguagem de programação *Visual Basic for Applications*, permitindo dar resposta ao problema colocado, que é o cálculo das demais correntes de curto-circuito num determinado barramento de uma instalação e, deste modo, poder ser utilizada como auxílio no projeto de linhas de transporte e distribuição e subestações elétricas.

Abstract

This document corresponds to the development of the Master's dissertation in Electrical and Computer Engineering, Major Energy, from the Faculty of Engineering of the University of Porto, in partnership with QUADRANTE Engenharia e Consultoria S.A.

The fundamental theme of this dissertation was to calculate the currents of short-circuit, with the goal of allowing the user to calculate the expected values in the buses of a given installation and therefore assist in the execution of engineering projects.

A short circuit arises in the event of a defect, which may have harmful consequences for the respective installation as well as all the equipment and accessories that constitute the electrical system. In this way, a correct determination of the short-circuit currents is helpful for the designer.

This tool was developed in Microsoft Office Excel and the Visual Basic for Applications was used as programming language, allowing to respond to the posed problem, which is to calculate the short-circuit currents in a specific bus of an installation and therefore being able to be used as support in the design of transmission and distribution lines and electric substations.

Agradecimentos

O maior agradecimento de todos vai para os meus pais e irmão, pelo apoio incondicional e pelos sacrifícios realizados durante estes anos. Sem eles, nada disto seria possível concretizar.

Ao meu orientador, o Professor Doutor José Eduardo Neves Roque Neves dos Santos, pela confiança para o desenvolvimento desta dissertação, bem como a constante disponibilidade e amizade.

A toda a equipa da QUADRANTE, pela forma como fui recebido, em especial ao Engenheiro Armando Santos e ao Engenheiro Carlos Souto, pela disponibilidade, pelo apoio e pela ajuda fundamental no desenvolvimento da dissertação. Sem eles, este trabalho não seria possível de ser concluído com sucesso.

Ao meu companheiro de casa, Rúben Gaspar, que abraçou comigo esta etapa e, mais tarde, ao meu irmão, Luís, que se juntou a nós.

A todos os docentes e não docentes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que de certo modo, trabalharam para que fosse possível chegar a este momento.

A todos os meus amigos que este curso trouxe para a minha vida, bem como todos os meus amigos da “bila”.

A todos aqueles de forma direta ou indireta contribuíram para bons momentos durante esta etapa.

Muito obrigado.

Índice

Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Motivação e Objetivos	1
1.3 - Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2.....	3
Conceito de curto-circuito	3
2.1 - Organização de um Sistema Elétrico de Energia	3
2.2 - Conceito de curto-circuito	3
2.3 - Tipos de curto-circuito.....	5
2.4 - Correntes de curto-circuito	6
2.5 - Cálculo das correntes de curto-circuito	7
2.5.1 - Corrente inicial de curto-circuito	7
2.5.1.1 - Cálculo da corrente Inicial Simétrica de curto-circuito trifásica I_k''	7
2.5.1.2 - Cálculo da corrente Inicial de curto-circuito fase-fase I_{k2}''	8
2.5.1.3 - Cálculo da corrente Inicial de curto-circuito fase-fase-terra I_{kE2}''	9
2.5.1.4 - Cálculo da corrente Inicial de curto-circuito fase-terra I_{k1}''	9
2.5.2 - Corrente máxima de curto-circuito.....	9
2.5.2.1 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito trifásica I_p	9
2.5.2.2 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito fase-fase I_{p2}	10
2.5.2.3 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito fase-fase-terra I_{p2E}	11
2.5.2.4 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito fase-terra I_{p1}	11
2.5.3 - Corrente simétrica de curto-circuito cortada.....	11
2.5.4 - Corrente simétrica de curto-circuito permanente	12
2.6 - Considerações finais.....	12
Capítulo 3.....	15
Ferramenta de cálculo - 4C's.....	15
3.1 - Introdução.....	15
3.2 - Etapas na Conceção da ferramenta	15
3.3 - <i>Microsoft Office Excel</i>	16
3.4 - Desenvolvimento da ferramenta	17
3.4.1 Funcionalidades da ferramenta	18
3.4.1.1 - Apresentação.....	19
3.4.1.2 - Instruções	20
3.4.1.3 - Rede	22
3.4.1.4 - Resultados	28
3.4.1.5 - Auxiliar	28
3.5 - Teste Funcional	30
3.6 - Validação da ferramenta	30
3.7 - Apresentação da ferramenta	31
3.8 - Considerações finais.....	31
Capítulo 4.....	33
Validação de resultados com recurso ao 4C's.....	33
4.1 - Exercício simples de obtenção das correntes de curto-circuito	33
4.2 - Projetos reais de Engenharia	33
Capítulo 5.....	35

Conclusões e Trabalho Futuro	35
5.1 - Conclusões	35
5.2 - Trabalho Futuro	36

Lista de figuras

Figura 2.1 - Organização de um SEE.	3
Figura 2.2 - Forma de onda das diversas fases de um curto-circuito A.C. longe de um gerador [2].	5
Figura 2.3 - Curto-Circuito Trifásico [2].	6
Figura 2.4 - Curto-circuito fase-terra [2].	6
Figura 2.5 - Curto-circuito fase-fase [2].	6
Figura 2.6 - Curto-circuito fase-fase-terra [2].	6
Figura 2.7 - Tabela do fator de tensão [2].	8
Figura 2.8 - Fator k como função de R/X ou X/R [2].	10
Figura 2.9 - Valores da relação de X/R prevista para o nível de tensão de 150kV da subestação de Portimão [5].	10
Figura 3.1 - Passos para a execução de uma tarefa num programa.	16
Figura 3.2 - <i>UserForm</i> para introdução de dados.	17
Figura 3.3 - <i>Module</i> onde está escrita a <i>macro</i> que permite ao utilizador aceder a janela de introdução de dados quando carregar no botão respetivo.	17
Figura 3.4 - Botão que permite a abertura do <i>UserForm</i> da figura 3.2, onde foi atribuída a <i>macro</i> descrita no <i>Module</i> da figura 3.3.	17
Figura 3.5 - Apresentação de resultados na memória descritiva [10].	18
Figura 3.6 - Cabeçalho do separador Apresentação.	19
Figura 3.7 - Cabeçalho do separador Instruções.	19
Figura 3.8 - Cabeçalho do separador Rede.	19
Figura 3.9 - Cabeçalho do separador Resultados.	19
Figura 3.10 - Cabeçalho do separador Auxiliar.	19
Figura 3.11 - Menus da ferramenta, visível em todas as páginas da mesma.	19
Figura 3.12 - Secção de informações do separador Apresentação, relacionadas com o seu criador.	20
Figura 3.13 - Secção de informações do separador Apresentação, relacionadas o utilizador.	20
Figura 3.14 - Rede para configuração, no separador Rede da ferramenta.	22

Figura 3.15 - Janela de introdução dos dados da rede.	23
Figura 3.16 - Janela de introdução dos dados do cabo.	23
Figura 3.17 - Janela de introdução de dados dos transformadores.	24
Figura 3.18 - Janela de introdução dos dados do nível de tensão em cada barramento.	24
Figura 3.19 - Janela de introdução do valor de X/R	24
Figura 3.20 - Caminho pelo Cabo P selecionado.	25
Figura 3.21 - Mensagem de seleção do Cabo P.	25
Figura 3.22 - Mensagem de erro caso o utilizador tente ativar o caminho pelo Transformador A com o caminho pelo Cabo P ativo.	25
Figura 3.23 - Caminho pelo Transformador A selecionado.	25
Figura 3.24 - Mensagem de seleção do Transformador A.	25
Figura 3.25 - Mensagem de erro caso o utilizador tente ativar o caminho pelo Cabo P com o caminho pelo Transformador A ativo.	25
Figura 3.26 - Mensagem de erro caso o utilizador tente gravar um número negativo para o valor de um nível de tensão.	26
Figura 3.27 - Mensagem de erro caso o utilizador tente gravar texto para o valor de um nível de tensão.	26
Figura 3.28 - Mensagem de erro caso o utilizador tente gravar sem inserir as unidades.	26
Figura 3.29 - Mensagem de erro caso o utilizador não selecione nenhuma opção disponível.	26
Figura 3.30 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre a rede.	27
Figura 3.31 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre o respetivo cabo, neste caso, Cabo L.	27
Figura 3.32 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre o respetivo transformador, neste caso, Transformador A.	27
Figura 3.33 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre a tensão para cada nível correspondente.	27
Figura 3.34 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre a relação X/R	28
Figura 3.35 - Tabela com o resultado das correntes de curto-circuito calculadas para o nível de tensão correspondente.	28
Figura 3.36 - Circuito visto do ponto de defeito [3].	29
Figura 3.37 - Tabelas de armazenamento da impedância equivalente vista de cada barramento.	29
Figura 3.38 - Tabelas de seleção do fator de tensão de acordo com a tensão em cada nível.	29

Figura 3.39 - Tabelas de armazenamento da relação X/R e calculo do respetivo k	30
Figura 3.39 - Resultados obtidos com recurso ao 4C's para determinar as correntes de curto-circuito.	34
Figura 3.40 - Resultados previamente conhecidos das correntes de curto-circuito [10]......	34

Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Botões e regras de utilização da ferramenta.	21
---	-----------

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas:

A	Ampère
AC	<i>Alternating current</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa tensão
CC	Curto-circuito
E-Redes	E-Redes
ETAP	<i>Software for electrical power systems</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
kA	Quilo Ampère
km	Quilómetro
kV	Quilo Volt
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
MW	<i>Mega Watt</i>
QUADRANTE	QUADRANTE Engenharia e Consultoria S.A.
REN	Redes Energéticas Nacionais
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
SEE	Sistema Elétrico de Energia
V	Volt
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
4C's	Calculadora de Correntes de Curto-Circuito

Lista de símbolos

X	Reatância
R	Resistência
Z	Impedância
I''_k	Corrente inicial simétrica de curto-circuito trifásico
c	Fator de tensão
I''_{k2}	Corrente inicial de curto-circuito fase-fase
I''_{kE2E}	Corrente inicial de curto-circuito fase-fase-terra
I''_{k1}	Corrente inicial de curto-circuito fase-terra

I_p	Valor de pico da corrente de curto-circuito trifásica
I_{p2}	Valor de pico da corrente de curto-circuito fase-fase
I_b	Corrente simétrica de curto-circuito cortada
I_k	Corrente simétrica de curto-circuito permanente
f	Fator de tensão
U_n	Tensão nominal do sistema
X / R	Relação X/R
Z_k	Impedância de defeito no ponto k
Z_1	Impedância direta ou de sequência positiva.
Z_2	Impedância inversa ou de sequência negativa.
Z_0	Impedância homopolar ou de sequência zero.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será feita uma introdução ao presente trabalho, de forma a explicitar o enquadramento, os seus objetivos e a estrutura do documento.

1.1 - Enquadramento

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Tendo como tema principal o cálculo das correntes de curto-circuito nos múltiplos barramentos de uma instalação, com a realização deste trabalho é esperado o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que permita ao utilizador determinar os valores dos níveis das correntes de curto-circuito esperados nos barramentos de uma dada instalação, dependendo da configuração da mesma, bem como as características dos equipamentos que a compõem.

Assim, esta ferramenta terá de efetuar os passos e cálculos necessários para obtenção dos valores de curto-circuito de uma forma simples e intuitiva, mas ao mesmo tempo o mais precisa e abrangente possível, na medida em que consiga dar resposta quando confrontada com situações de casos reais onde poderá ser utilizada, por exemplo, no cálculo de correntes de curto-circuito em linhas de transporte de energia, subestações elétricas, e postos de transformação, finalidade do seu desenvolvimento e utilização.

1.2 - Motivação e Objetivos

Atualmente, o projetista tem de dar respostas cada vez mais rápidas aos projetos onde se encontra inserido, com a devida qualidade e precisão. Deste modo, o desenvolvimento de ferramentas com vista a auxiliar a realização destes cálculos com o objetivo de obter os resultados pretendidos, é uma mais-valia.

Embora existam programas e *software* próprio para a realização de tais cálculos, estes encontram-se desenvolvidos numa ferramenta que não é de uso comum quando comparada com outros programas específicos de cálculos. Neste sentido, com esta dissertação é esperada a criação de uma ferramenta desenvolvida em *Microsoft Office Excel*, permitindo não só

ultrapassar as desvantagens referidas, bem como ser um *software* em que todos os elementos da QUADRANTE estejam familiarizados com o seu funcionamento.

Esta ferramenta permitirá, portanto, otimizar o tempo de elaboração do projeto elétrico, auxiliando o projetista, evitando a dependência de terceiros para obtenção de certos resultados fundamentais para o avanço e validação do projeto elétrico.

Como requisitos principais, a ferramenta criada terá de ser capaz de dar resposta aos seguintes pontos:

- Ser capaz de determinar as correntes de curto-circuito trifásicas, fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, bem como todos os seus valores máximos e mínimos;
- Permitir traçar o caminho da energia, entre condutores e transformadores;
- Exportar os resultados obtidos para *PDF*;
- Como resultados, a ferramenta, terá de permitir a obtenção do valor das correntes iniciais de curto-circuito, máximas e mínimas, as correntes de pico, as correntes cortadas, bem como as correntes permanentes, para todos os tipos de curto-circuito considerados.

Deste modo, procedeu-se ao estudo das diversas formulações matemáticas que permitam determinar o valor de tais correntes, sendo posteriormente implementadas na respetiva ferramenta desenvolvida.

1.3 - Estrutura da dissertação

Para além deste primeiro capítulo, este documento é constituído por mais quatro capítulos.

No capítulo 2, são evidenciados todos os conceitos relacionados com o tema de curto-circuitos, bem como demonstradas as formulações matemáticas que permitem obter os resultados pretendidos, de acordo com a norma *IEC 60909*, padrão internacional para o cálculo das correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos de corrente alternada.

No capítulo 3, é apresentada a ferramenta de cálculo desenvolvida, onde são evidenciadas as suas funcionalidades bem com a sua interação com o utilizador.

No capítulo 4, procedeu-se a uma análise comparativa dos resultados obtidos das correntes de curto-circuito pela ferramenta desenvolvida, com os resultados previamente disponibilizados, em contexto académico e num projeto real de engenharia.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, bem como algumas propostas de melhoria no trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Conceito de curto-circuito

2.1 - Organização de um Sistema Elétrico de Energia

Um Sistema Elétrico de Energia (SEE), representa uma estrutura organizada, desde a produção de energia elétrica, até ao seu consumo. Fazem parte desta estrutura todas as formas de produção e geração de energia elétrica, todos os locais, tipicamente denominados de subestações, onde a tensão poderá ser elevada ou reduzida, dependendo do tipo de subestação, todas as linhas de transmissão e distribuição e, por último, todos os consumidores.

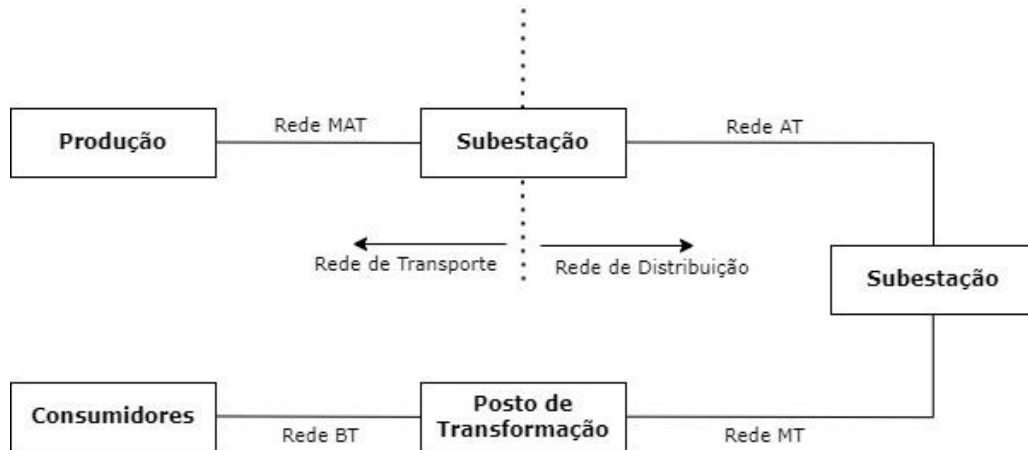


Figura 2.1 - Organização de um SEE.

Uma das principais preocupações é proteger adequadamente os diversos elementos que compõem esta estrutura contra diversos fatores que possam ocorrer, e que sejam prejudiciais ao seu bom funcionamento, como, por exemplo, a ocorrência de curto-circuitos.

2.2 - Conceito de curto-circuito

Segundo J. Paiva, um curto-circuito é definido como um percurso de baixa impedância, resultante de um defeito, através do qual se fecha uma corrente, em geral, muito elevada,

tratando-se, portanto, de uma situação anormal em sistemas elétricos de energia que requer ações imediatas no sentido de eliminar rapidamente esta corrente, evitando, assim, danos nas estruturas [1].

Um curto-circuito pode ocorrer em diversos locais num SEE, tais como:

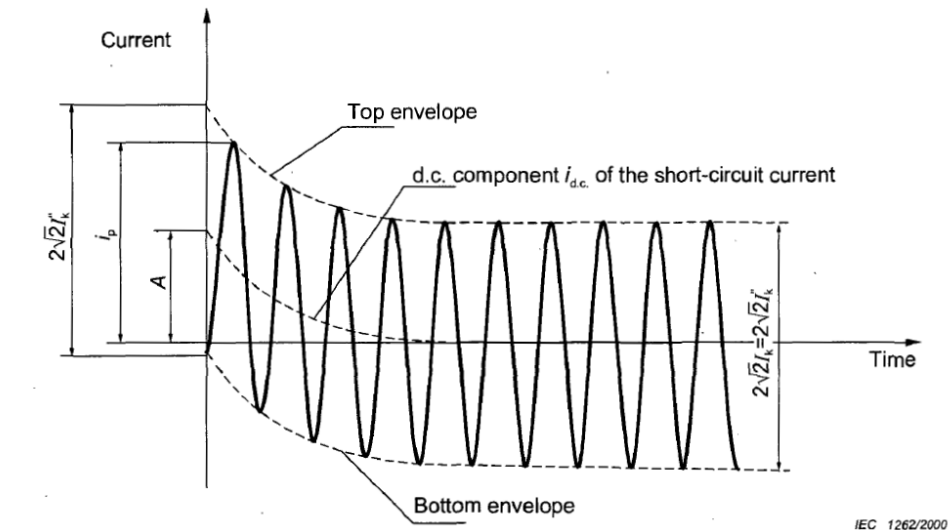
- Barramentos das subestações, Postos de Transformação e Quadros Elétricos;
- Linhas de transporte e distribuição aéreas;
- Cabos subterrâneos;
- Todos os equipamentos e acessórios que constituem um SEE.

A simulação numérica do cálculo da corrente de curto-circuito em determinados pontos da rede é fundamental na execução de projetos e exploração das instalações e da rede. O conhecimento destes valores permite a adoção de medidas e ações necessárias com vista a minimizar as consequências no caso da ocorrência de um defeito. Com base nestes valores, são colocados e dimensionados dispositivos capazes de interromper estas correntes, bem como a garantia de que todos os componentes que fazem parte do sistema, quando percorridos por estas correntes, possam suportar os seus efeitos.

De forma geral, o cálculo numérico das correntes de curto-circuito numa determinada instalação tem como principal finalidade os seguintes aspetos:

- Previsão dos esforços térmicos e eletrodinâmicos provocados pela passagem da corrente de defeito que todos os elementos de um sistema terão de suportar, como o caso de barramentos, seccionadores e condutores, até ao instante de atuação das proteções;
- Determinação do poder de corte das proteções e respetiva regulação, como disjuntores e fusíveis. Mediante os valores obtidos para as correntes de curto-circuito máximas, seleciona-se o poder de corte-mínimo destes dispositivos e o respetivo tempo de disparo e atuação.

No instante em que ocorre um curto-circuito, a corrente aumenta rapidamente, atingindo em poucos segundos o seu valor máximo, seguindo-se a fase de decadência da mesma, atingindo valores transitórios e, permanecendo, por último, o valor da corrente de curto-circuito permanente no sistema. Estas diversas fases de um curto-circuito podem ser observadas na figura 2.2 [2].



I_k' = initial symmetrical short-circuit current

i_p = peak short-circuit current

I_k = steady-state short-circuit current

Figura 2.2 - Forma de onda das diversas fases de um curto-circuito A.C. longe de um gerador [2].

2.3 - Tipos de curto-circuito

Num SEE, um curto-circuito pode ser considerado simétrico ou assimétrico, de acordo com o número de fases que envolve.

- Curto-circuito trifásico simétrico: este tipo de curtos-circuitos afeta simultaneamente as três fases do sistema, sendo simétrico no caso de a impedância de defeito ser igual em todas as fases. Quando esta impedância é nula, o curto-circuito designa-se franco, figura 2.3 [1].
- Curto-circuito fase-terra: Envolve apenas uma fase do sistema e a terra, figura 2.4. [1].
- Curto-circuito fase-fase: Envolve duas fases do sistema, figura 2.5 [1].
- Curto-circuito fase-fase-terra: Envolve duas fases do sistema e a terra, figura 2.6 [1].

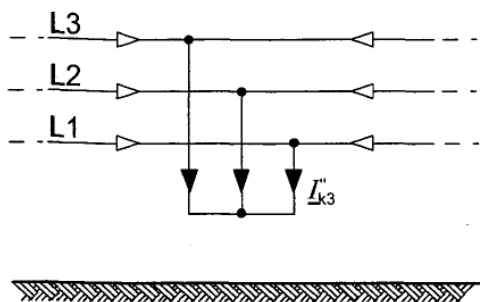


Figura 2.3 - Curto-Circuito Trifásico [2].

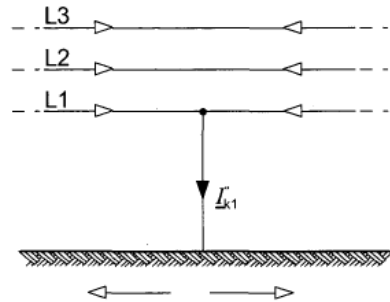


Figura 2.4 - Curto-circuito fase-terra [2].

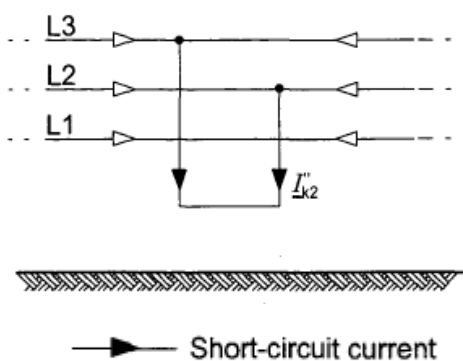


Figura 2.5 - Curto-circuito fase-fase [2].

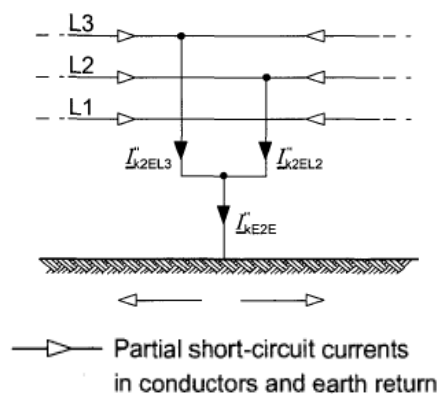


Figura 2.6 - Curto-circuito fase-fase-terra [2].

2.4 - Correntes de curto-circuito

Segundo a norma internacional IEC 60909-0, são definidas as seguintes correntes de curto-circuito:

- I''_k **Corrente inicial simétrica de curto-circuito:** Valor eficaz da componente simétrica da corrente de curto-circuito no instante da ocorrência do defeito no ponto k [3] [4];
- I_p **Valor máximo (pico) da corrente de curto-circuito:** Valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito [3] [4];
- I_b **Corrente simétrica de curto-circuito cortada:** Valor eficaz de um ciclo da componente alternada simétrica no instante da separação dos contactos do aparelho de corte [3] [4];
- I_k **Corrente simétrica de curto-circuito permanente:** Valor eficaz da corrente de curto-circuito que permanece no sistema após o fim dos fenómenos transitórios [3] [4].

2.5 - Cálculo das correntes de curto-circuito

De acordo com a norma *IEC 60909-0*, para o cálculo das diversas correntes de curto-circuito mencionadas no capítulo anterior, importa realçar os seguintes aspetos, como a não alteração do tipo de curto-circuito ou a não alteração da rede, durante o defeito.

Para o cálculo destas correntes será necessária a redução da rede a uma impedância equivalente, no ponto de defeito, Z_k , caracterizada pela respetiva resistência e reatância.

A ferramenta que se pretende desenvolver apenas irá considerar correntes de curto-circuito afastadas de geradores, logo, no decorrer deste capítulo, as expressões de cálculo apresentadas apenas serão para curto-circuitos afastados de geradores.

2.5.1 - Corrente inicial de curto-circuito

2.5.1.1 - Cálculo da corrente Inicial Simétrica de curto-circuito trifásica I''_k

O valor da corrente simétrica inicial de curto-circuito é resultado mais importante a ser determinado. Este valor pode ser calculado através da seguinte expressão [2]:

$$I''_k = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (2.1)$$

Onde:

- U_n - Tensão nominal;
- Z_k - Impedância de curto-circuito, $Z_k = |R_k + jX_k|$;
- c - Fator de tensão, variável de acordo com o nível de tensão nominal e tipo de curto-circuito. Os diferentes valores de c , podem ser encontrados na figura 2.7.

Nominal voltage U_n	Voltage factor c for the calculation of	
	maximum short-circuit currents $c_{\max}^{1)}$	minimum short-circuit currents $c_{\min}$
Low voltage 100 V to 1 000 V (IEC 60038, table I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Medium voltage >1 kV to 35 kV (IEC 60038, table III)	1,10	1,00
High voltage²⁾ >35 kV (IEC 60038, table IV)		

¹⁾ $c_{\max}U_n$ should not exceed the highest voltage U_m for equipment of power systems.

²⁾ If no nominal voltage is defined $c_{\max}U_n = U_m$ or $c_{\min}U_n = 0,90 \times U_m$ should be applied.

³⁾ For low-voltage systems with a tolerance of +6 %, for example systems renamed from 380 V to 400 V.

⁴⁾ For low-voltage systems with a tolerance of +10 %.

Figura 2.7 - Tabela do fator de tensão [2].

2.5.1.2 - Cálculo da corrente Inicial de curto-circuito fase-fase I''_{k2}

O valor da corrente inicial de curto-circuito entre duas fases deriva do valor da corrente inicial de curto-circuito simétrica trifásica [2]:

$$I''_{k2} = \frac{c \times U_n}{|Z_1 + Z_2|} = \frac{c \times U_n}{2|Z_1|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I''_k \quad (2.2)$$

Onde:

- U_n - Tensão nominal;
- Z_1 - Impedância positiva;
- Z_2 - Impedância negativa;
- c - Fator de tensão, variável de acordo com o nível de tensão nominal e tipo de curto-circuito. Os diferentes valores de c , podem ser encontrados na figura 2.6;
- I''_k - Valor da corrente inicial simétrica de curto-circuito trifásica.

Durante o estado inicial de um curto-circuito fase-fase, a impedância negativa é aproximadamente igual a impedância positiva, assim, é possível, na equação 2.2, efetuar a seguinte aproximação $Z_1 = Z_2$ [2].

2.5.1.3 - Cálculo da corrente Inicial de curto-circuito fase-fase-terra I''_{kE2}

O valor da corrente inicial de curto-circuito entre duas fases com ligação à terra, é possível de calcular através da seguinte expressão [2]:

$$I''_{kE2} = \frac{\sqrt{3} \times c \times U_n}{|Z_1 + 2 \times Z_0|} \quad (2.3)$$

Onde:

- U_n - Tensão nominal;
- Z_1 - Impedância positiva;
- Z_0 - Impedância de sequência zero;
- c - Fator de tensão, variável de acordo com o nível de tensão nominal e tipo de curto-circuito. Os diferentes valores de c , podem ser encontrados na figura 2.6;

2.5.1.4 - Cálculo da corrente Inicial de curto-circuito fase-terra I''_{k1}

O valor da corrente inicial de curto-circuito entre uma fase e a terra é possível de calcular através da seguinte expressão [2]:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \times c \times U_n}{|2 \times Z_1 + Z_0|} \quad (2.4)$$

Onde:

- U_n - Tensão nominal;
- Z_1 - Impedância positiva;
- Z_0 - Impedância de sequência zero;
- c - Fator de tensão, variável de acordo com o nível de tensão nominal e tipo de curto-circuito. Os diferentes valores de c , podem ser encontrados na figura 2.6;

2.5.2 - Corrente máxima de curto-circuito

2.5.2.1 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito trifásica I_p

O valor da corrente máxima de curto-circuito trifásica é calculado através da seguinte expressão [2]:

$$I_p = k \times \sqrt{2} \times I''_k \quad (2.5)$$

Onde:

- I''_k - Valor da corrente inicial simétrica de curto-circuito trifásica.
- k - Fator sobre o rácio R/X calculado através da equação 1.6.

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (2.6)$$

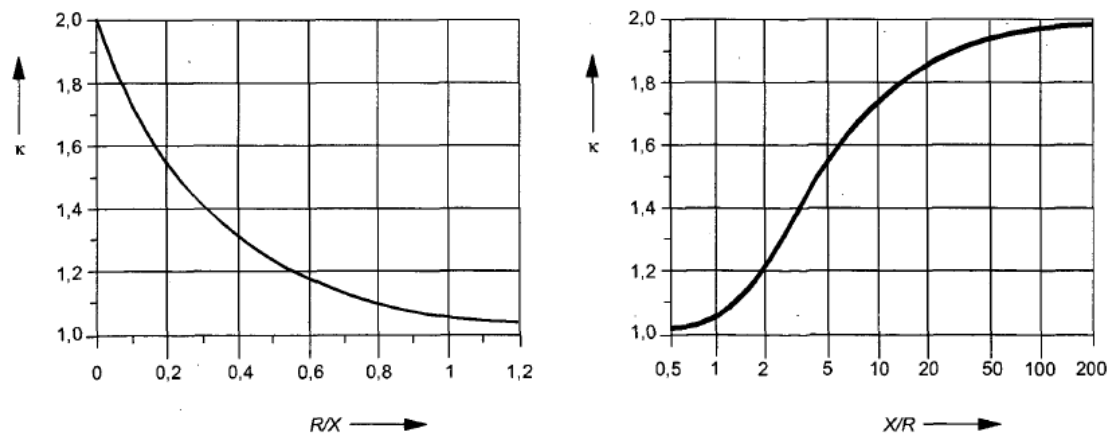


Figura 2.8 - Fator k como função de R/X ou X/R [2].

Na execução de projetos de engenharia, a relação de X/R é na maioria dos casos fornecida pelas entidades responsáveis das redes, como o caso da REN e da E-Redes, estando o seu valor previamente definido sendo fornecido ao projetista, devendo este adotar tal valor na execução do projeto, figura 2.9.

Ano	X/R	
	Máx.	Mín.
2020	6.8	5.2
2024	6.9	5.2

Figura 2.9 - Valores da relação de X/R prevista para o nível de tensão de 150kV da subestação de Portimão [5].

2.5.2.2- Cálculo da corrente máxima de curto-circuito fase-fase I_{p2}

O valor da corrente máxima de curto-circuito entre duas fases é calculado através da seguinte expressão [2]:

$$I_{p2} = k \times \sqrt{2} \times I''_{k2} \quad (2.7)$$

Onde:

- I''_{k2} - Valor da corrente inicial de curto-circuito fase-fase.
- k - Fator sobre o rácio R/X calculado através da equação 1.6.

Quando o valor de $Z_1 = Z_2$ o valor da corrente máxima de curto-circuito entre duas fases, pode ser obtido da seguinte forma [2]:

$$I_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_p \quad (2.8)$$

Onde:

- I_p - Valor máximo da corrente de curto-circuito trifásica.

2.5.2.3 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito fase-fase-terra I_{p2E}

O valor da corrente máxima de curto-circuito entre duas fases envolvendo a terra é calculado através da seguinte expressão [2]:

$$I_{p2E} = k \times \sqrt{2} \times I''_{k2E} \quad (2.9)$$

Onde:

- I''_{k2E} - Valor da corrente inicial de curto-circuito fase-fase-terra.
- k - Fator sobre o rácio R/X calculado através da equação 1.6.

2.5.2.4 - Cálculo da corrente máxima de curto-circuito fase-terra I_{p1}

O valor da corrente máxima de curto-circuito entre uma fase e a terra é calculado através da seguinte expressão [2]:

$$I_{p1} = k \times \sqrt{2} \times I''_{k1} \quad (2.10)$$

Onde:

- I''_{k1} - Valor da corrente inicial de curto-circuito fase-terra.
- k - Fator sobre o rácio R/X calculado através da equação 1.6.

2.5.3 - Corrente simétrica de curto-circuito cortada

O valor das correntes de curto-circuito cortadas, é igual ao valor das correntes de curto-circuito iniciais, dado que se trata de uma situação considerada longe dos geradores. Assim [2]:

$$I_b = I_k'' \quad (2.11)$$

$$I_{b2} = I_{k2}'' \quad (2.12)$$

$$I_{b2E} = I_{k2E}'' \quad (2.13)$$

$$I_{b1} = I_{kl}'' \quad (2.14)$$

2.5.4 - Corrente simétrica de curto-circuito permanente

O valor das correntes de curto-circuito cortadas, é igual ao valor das correntes de curto-circuito iniciais. Assim [2]:

$$I_{k2} = I_{k2}'' \quad (2.15)$$

$$I_{k2E} = I_{k2E}'' \quad (2.16)$$

$$I_{k1} = I_{kl}'' \quad (2.17)$$

2.6 - Considerações finais

Neste capítulo foram expostos todos os conceitos relevantes para o desenvolvimento da ferramenta do cálculo, bem como as expressões matemáticas que permitem a obtenção de tais correntes de curto-circuito, de acordo com a norma aplicável, *IEC 60909-0*.

Existem quatro tipos de correntes de curto-circuito fundamentais para o trabalho a desenvolver, sendo elas:

- Corrente inicial simétrica de curto-circuito;
- Valor máximo da corrente de curto-circuito;
- Corrente simétrica de curto-circuito cortada;
- Corrente simétrica de curto-circuito permanente.

Estas quatro correntes de curto-circuitos devem ser calculadas para os seguintes casos:

- Curto-circuito trifásico;
- Curto-circuito fase-fase;
- Curto-circuito fase-fase-terra;

- Curto-circuito fase-terra.

Este estudo realizado foi o ponto de partida para a criação da ferramenta, na medida em que permitiu a aquisição do conhecimento necessário, incorporando a ferramenta todos os conceitos expostos neste capítulo.

Capítulo 3

Ferramenta de cálculo - 4C's

3.1 - Introdução

A ferramenta desenvolvida foi denominada de 4C's - Calculadora de Correntes de Curto-Circuito, e tem como principal objetivo permitir que todos os colaboradores da Quadrante consigam rapidamente obter um determinado valor de uma corrente de curto-circuito, nos projetos que se encontram a desenvolver, evitando tempo de espera e paragem na execução dos mesmos, na medida em que possibilita a determinação de tais valores sem a intervenção de terceiros.

3.2 - Etapas na Conceção da ferramenta

De modo a dar resposta ao problema apresentado, foram consideradas 8 etapas fundamentais a cumprir para concluir com sucesso a criação e desenvolvimento da ferramenta de cálculo:

1. Apresentação e conhecimento do problema;
2. Estudo prévio dos conceitos relacionados com o problema apresentado;
3. Análise do programa onde a ferramenta irá ser desenvolvida;
4. Esquematização de um caminho de orientação para a resolução do problema (linhas orientadoras);
5. Implementação e desenvolvimento da ferramenta (implementação das linhas orientadoras);
6. Teste funcional;
7. Validação da ferramenta;

8. Apresentação e disponibilização da ferramenta à equipa de trabalho da secção de alta tensão da QUADRANTE.

Nos capítulos seguintes são expostas e discriminadas as etapas relacionadas com o desenvolvimento da ferramenta.

3.3 - Microsoft Office Excel

O *Microsoft Office Excel*, é uma poderosa ferramenta de cálculo que oferece várias opções para desenvolver ferramentas e aplicações através de diversos tipos de linguagem de programação [6][7].

O *Visual Basic para aplicações*, VBA, é um tipo de linguagem de programação reconhecida pelo *Microsoft Office Excel*, que permite a adição de funções e comandos previamente definidos pelo utilizador, isto é, uma linguagem “guiada por eventos” usada para desenvolver aplicações [6][7][8].

Para resolver um problema de programação devemos previamente conhecer qual a entrada do programa, o conjunto de regras e operações a realizar sobre os dados introduzidos e, por último, quais os resultados que são esperados através do processamento dos dados.



Figura 3.1 - Passos para a execução de uma tarefa num programa.

No *Microsoft Office Excel* existem distintas maneiras de proceder à introdução dos dados, como por exemplo a introdução direta de um valor numa respetiva célula, ou através de janelas onde será solicitado o dado a introduzir [8].

Para a fase de processamento, o criador do programa deve compreender muito bem a relação entre a entrada e a saída, para através de uma sequência de passos, converter os dados introduzidos nos respetivos resultados pretendidos. Esta sequência de passos é denominada de algoritmo, onde devem figurar todos os caminhos e eventos possíveis que o utilizador da ferramenta poderá necessitar de percorrer até chegar à saída. O controlo entre estes eventos pode ser realizado pelo utilizador, pressionando teclas ou botões específicos que permitam ao utilizador operar a ferramenta de acordo com o pretendido [8].

Por último, a saída corresponde a apresentação dos resultados pretendidos após a fase de processamento.

A interação em cima mencionada entre o utilizador e o programa é realizada através de *UserForms* e *Modules*. Os *UserForms* correspondem a janelas ou caixas de diálogo, os *Modules* correspondem a parte oculta do programa, não visível para o utilizador comum, onde são descritos algoritmos de operação do programa, denominadas de *macros* ou ordens, num termo mais comum. Um exemplo de um *UserForm*, é o presente na figura 3.2, onde foi criada uma janela para o utilizador inserir os seus dados pessoais, o *Module*, presente na figura 3.3, permite ao utilizador abrir a janela de introdução de dados, quando carregar no botão “Inserir Dados”, figura 3.4, após a atribuição da *macro* ao botão em questão [8][9].

Figura 3.2 - UserForm para introdução de dados.

```
Sub Botão_inserir_dados_Click()
    dados_utilizador.Show
End Sub
```

Figura 3.3 - Module onde está escrita a macro que permite ao utilizador aceder a janela de introdução de dados quando carregar no botão respetivo.



Figura 3.4 - Botão que permite a abertura do UserForm da figura 3.2, onde foi atribuída a macro descrita no Module da figura 3.3.

3.4 - Desenvolvimento da ferramenta

Após o critério de atribuição do tema da respetiva dissertação de mestrado, foi realizada uma reunião com o Engenheiro Armando Santos e com o Engenheiro Carlos Souto, onde foi apresentado o problema, bem como a finalidade do desenvolvimento da ferramenta.

Foi ainda fornecido algum material de suporte bibliográfico, como a Norma IEC 60909 e diversos relatórios e projetos alusivos ao estudo de curto-circuitos, onde a QUADRANTE participou.

Nesta reunião, ficou definido que a ferramenta a desenvolver teria de ser capaz de apresentar os resultados das correntes de curto-circuito, como os presentes na memória descritiva da central solar fotovoltaica de Esteveira, figura 3.5.

6.1 60 kV

	Maximum				Minimum			
	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$
I''_k [kA]	4,088	1,867	3,452	3,639	3,685	1,774	3,192	3,349
i_b [kA]	6,801	3,106	5,743	6,055	6,593	3,173	5,709	5,991
I_b [kA]	-	1,867	3,452	3,639	-	1,774	3,192	3,349
I_k [kA]	4,088	1,867	3,452	3,639	3,685	1,774	3,192	3,349

TABLE 6 – 60 kV SHORT CIRCUIT CURRENTS

6.2 30 kV

	Maximum				Minimum			
	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$
I''_k [kA]	2,827	0,984	2,282	2,346	2,144	0,876	1,857	1,887
i_b [kA]	5,065	1,762	4,088	4,203	4,930	2,014	4,269	4,338
I_b [kA]	-	0,984	2,282	2,346	-	0,876	1,857	1,887
I_k [kA]	2,827	0,984	2,282	2,346	2,144	0,876	1,857	1,887

TABLE 7 – 30 kV SHORT CIRCUIT CURRENTS

6.3 600 V

	Maximum [kA]				Minimum [kA]			
	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$
I''_k [kA]	44,077	0	35,620	35,620	31,539	0	27,313	27,313
i_b [kA]	87,437	0	70,660	70,660	74,869	0	64,838	64,838
I_b [kA]	-	0	35,620	35,620	-	0	27,313	27,313
I_k [kA]	44,077	0	35,620	35,620	31,539	0	27,313	27,313

TABLE 8 – 600 V SHORT CIRCUIT CURRENTS

Figura 3.5 - Apresentação de resultados na memória descritiva [10].

Sendo assim, foi definido que a ferramenta teria de ser capaz de calcular as correntes de curto-circuito para cinco barramentos, podendo a ligação entre eles ser realizada através de um transformador de potência ou de um condutor.

Como foi suprarreferido, a sua criação e desenvolvimento teria de ser no *Microsoft Office Excel*.

3.4.1 Funcionalidades da ferramenta

A ferramenta 4C's encontra-se dividida fundamentalmente em 5 separadores, identificados pelos diferentes cabeçalhos e diferentes cores:

1. Apresentação, figura 3.6;
2. Instruções, figura 3.7;
3. Rede, figura 3.8;
4. Resultados, figura 3.9;
5. Auxiliar, figura 3.10.

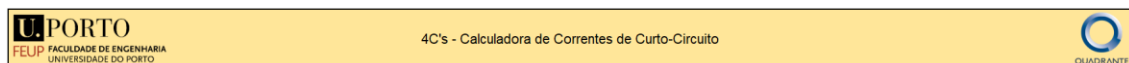


Figura 3.6 - Cabeçalho do separador Apresentação.

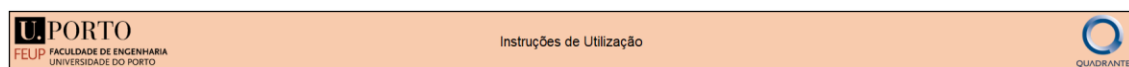


Figura 3.7 - Cabeçalho do separador Instruções.

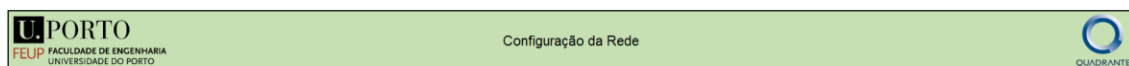


Figura 3.8 - Cabeçalho do separador Rede.

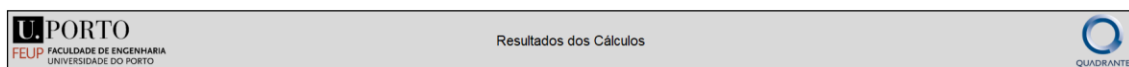


Figura 3.9 - Cabeçalho do separador Resultados.

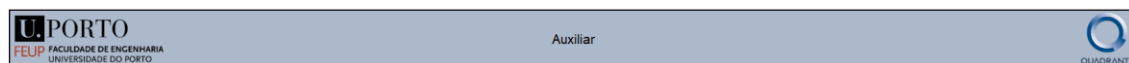


Figura 3.10 - Cabeçalho do separador Auxiliar.

Em todos os separadores da ferramenta, foi ainda acrescentado um menu com os diversos separadores do mesmo, permitindo a rápida e intuitiva alternância entre eles, carregando em cima do separador que se pretende visualizar, figura 3.11.



Figura 3.11 - Menus da ferramenta, visível em todas as páginas da mesma.

3.4.1.1 - Apresentação

O primeiro separador da ferramenta, é uma página introdutória onde é possível encontrar duas secções de dados. Na secção da esquerda temos dados sobre a ferramenta, tais como, o nome do autor, e-mail, versão da mesma, data e norma a que obedece para efetuar os cálculos

pretendidos. É Possível encontrar ainda a página *web* da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e da QUADRANTE bem como os menus da ferramenta, figura 3.12.

Autor	João Manuel Brunhoso Bebiano
E-Mail	up201505388@edu.fe.up.pt
Versão	1.0
Data	01/07/2022
Norma	IEC 60909

FEUP	https://sigarra.up.pt/feup/pt/web_page.Inicial
QUADRANTE	https://www.quadrante-engenharia.pt/

Menus do Programa			
APRESENTAÇÃO	INSTRUÇÕES	REDE	RESULTADOS

Figura 3.12 - Secção de informações do separador Apresentação, relacionadas com o seu criador.

Na secção da direita encontramos um conjunto de células editáveis onde o utilizador pode inserir o seu nome, a sua sigla, o número do projeto onde a ferramenta está a ser utilizada, de acordo com o número interno para identificação de projetos utilizado na QUADRANTE a data e um espaço para notas adicionais, figura 3.13.

Nome do utilizador	XXXX
Sigla	XXXX

Nº Projeto	TXXXX-XXXX-XX-XX-XXX-XX-XXX_XX
-------------------	--------------------------------

Data	XX/XX/20XX
-------------	------------

Notas	XXXX
--------------	------

Figura 3.13 - Secção de informações do separador Apresentação, relacionadas o utilizador.

3.4.1.2 - Instruções

No segundo separador da ferramenta são apresentadas todas as instruções e regras de utilização da mesma. São detalhadas as operações que cada botão permite fazer bem como o modo de configuração da rede apresentada no terceiro separador. Na tabela seguinte são apresentados todos os botões da ferramenta e descritas todas as operações que permitem realizar, bem como um conjunto de regras de operação.

Tabela 1.1 - Botões e regras de utilização da ferramenta.

	Pressionar o botão <u>Rede</u> para inserir os dados da rede
	Pressionar o botão <u>X/R</u> para inserir os dados da relação X/R .
	Pressionar o botão <u>Nível de Tensão</u> para inserir o nível de tensão corresponde do botão que for pressionado
	Pressionar o botão <u>Transformador</u> para inserir os dados correspondentes ao transformador do botão que que for pressionado
	Pressionar o botão <u>Cabo</u> para inserir os dados correspondentes ao cabo do botão que for pressionado
	Pressionar o botão <u>Cabo</u> para inserir os dados correspondentes aos cabos de chegada e saída do transformador do botão que for pressionado*
	Caminho pelo transformador correspondente inativo**
	Caminho pelo transformador correspondente ativo**
	Caminho pelo cabo correspondente inativo**
	Caminho pelo cabo correspondente ativo**
	Pressionar a imagem para proceder ao cálculo das correntes de curto-circuito do nível correspondente, sendo os resultados apresentados no separador RESULTADOS.
	Pressionar o botão para exportar para documento PDF o separador atual.
	Pressionar o botão <u>APAGAR</u> para apagar todos os dados, incluídos os resultados calculados.
* Quando não forem inseridos dados relativos aos cabos de chegada e saída do transformador, para calcular a corrente de curto-circuito nesse nível, apenas será considerada a impedância do transformador. ** Pressionar para ativar ou desativar o caminho por um transformador ou por um cabo. Entre dois níveis de tensão apenas pode estar selecionado o caminho por um transformador ou por um cabo, sendo impossível selecionar os dois. É assumido que a impedância de sequência zero dos transformadores é igual a impedância de sequência positiva, $Z_1 = Z_0$ Quando o resultado de uma ou mais correntes de curto-circuito apresentado nas tabelas do separador RESULTADOS for igual a zero, significa que o utilizador não introduziu os dados necessários para o cálculo de tal corrente. Os valores mais comuns em falta são a relação X/R e a impedância de sequência zero, Z_0.	

3.4.1.3 - Rede

O terceiro separador marca o início da utilização propriamente dita da ferramenta, onde é permitido ao utilizador configurar a rede em estudo, bem como a introdução de todos os dados para a obtenção das correntes de curto-circuito, figura 3.14.

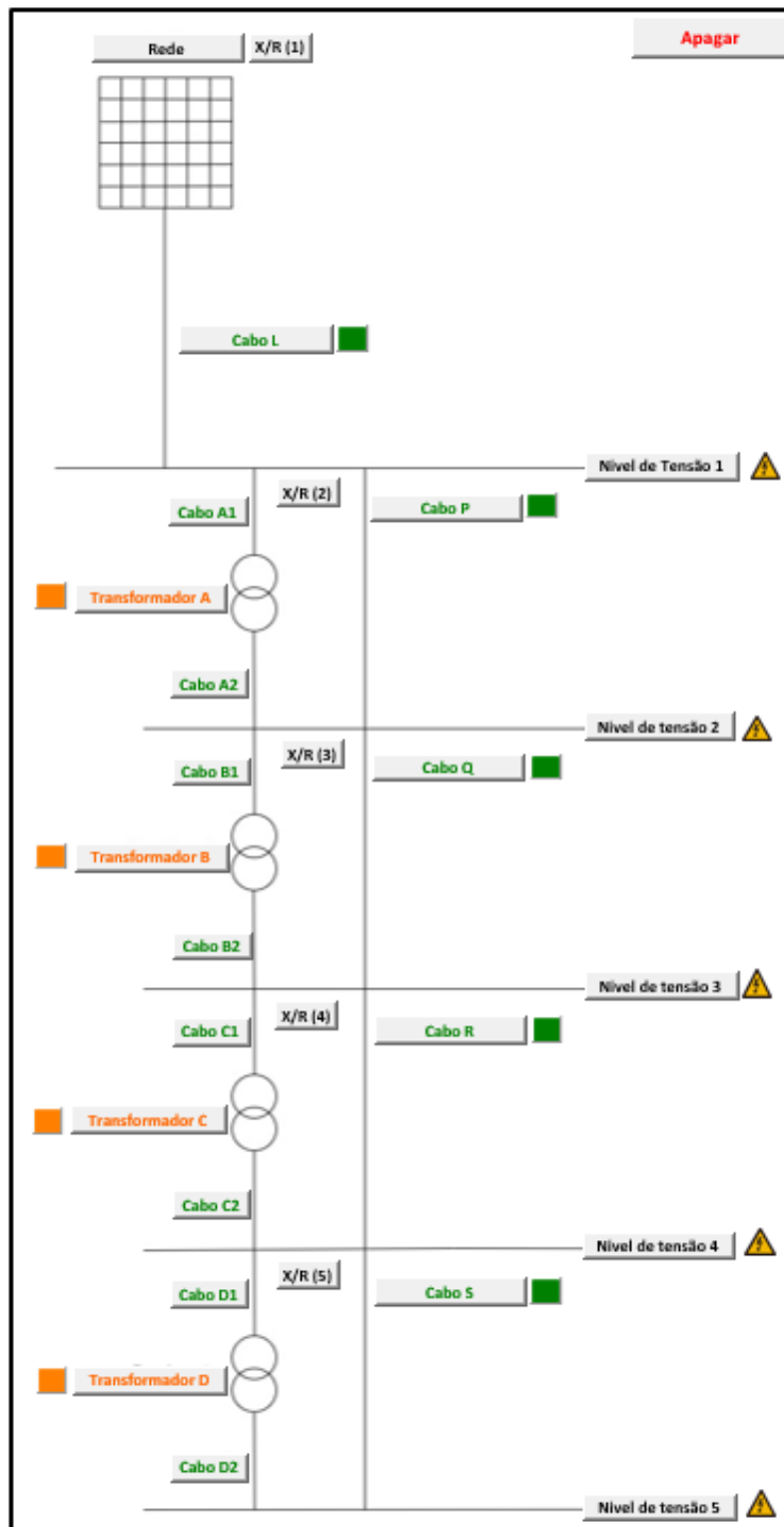


Figura 3.14 - Rede para configuração, no separador Rede da ferramenta.

Começando pela introdução dos dados da rede, o utilizador ao pressionar o botão rede abrirá uma janela para colocar os dados, nomeadamente a tensão e a potência de curto-circuito. Para terminar a introdução o utilizador terá de carregar no botão gravar, para guardar o valor introduzido e a janela fechar-se-á automaticamente, figura 3.15.

A janela 'Dados da Rede' possui um título 'Dados da Rede' e um botão de fechar 'X' no canto superior direito. Contém dois campos de entrada: 'Tensão [kV]' e 'Potência de Curto-Circuito [MVA]'. Cada campo tem um botão 'Limpar' ao lado. Abaixo dos campos, há um botão 'Gravar'.

Figura 3.15 - Janela de introdução dos dados da rede.

Ao pressionar o botão do cabo correspondente, por exemplo cabo L, abrirá novamente uma janela, figura 3.16, onde será solicitado ao utilizador a introdução dos dados do cabo que efetua a ligação entre a rede e o primeiro barramento.

Nesta janela, o utilizador tem a possibilidade de inserir a resistência e a reactância do cabo em questão, podendo seleccionar se os valores inseridos correspondem à totalidade do cabo em questão, ou se os mesmos se encontram em valor por unidade de comprimento, por exemplo, Ω/km , sendo necessário introduzir de seguida o respetivo comprimento do cabo.

Para proceder ao cálculo da impedância do cabo, o utilizador deve pressionar o botão Calcular para efetuar tais cálculos, e de seguida o botão Gravar para guardar o valor.

A janela 'Dados do Cabo' possui um título 'Dados do Cabo' e um botão de fechar 'X' no canto superior direito. Contém campos de entrada para: 'R1 [ohm]', 'x1 [ohm]', 'R0 [ohm]', 'x0 [ohm]', 'Comprimento', 'Z1 [ohm]', e 'Z0 [ohm]'. Há também botões 'Limpar', 'Calcular' e 'Gravar'. Entre os campos, há opções de seleção: 'Total', '/km', '/m' para os parâmetros de impedância, e 'km', 'm' para o comprimento.

Figura 3.16 - Janela de introdução dos dados do cabo.

A partir deste momento o utilizador terá a total autonomia para traçar o caminho da rede da forma que pretender, através de duas oportunidades de transição entre cada barramento, um transformador de potência ou um cabo.

Caso o utilizador pretenda efetuar a transição entre barramentos através de um cabo (P, Q, R e S), deverá proceder como anteriormente referido para o cabo L. Caso pretenda definir um

transformador deverá pressionar o botão transformador e abrirá uma janela para a introdução dos dados do mesmo, figura 3.17, pressionando posteriormente à introdução dos dados, o botão guardar, para gravar os dados.

A janela intitulada "Dados do Transformador" possui um botão de fechar no canto superior direito. Ela contém quatro campos de entrada de texto, cada um com uma etiqueta à esquerda e uma unidade selecionável à direita:

- Potência:** campo de texto, unidade selecionável entre "MVA" e "kVA".
- Tensão do Primário:** campo de texto, unidade selecionável entre "V" e "kV".
- Tensão do Secundário:** campo de texto, unidade selecionável entre "V" e "kV".
- Z' [%]:** campo de texto.

Existem dois botões de ação: "Limpar" ao lado da unidade de Potência e "Gravar" ao lado do campo Z' [%].

Figura 3.17 - Janela de introdução de dados dos transformadores.

Caso o utilizador tenha o caminho por um transformador ativo, é também possível introduzir os dados dos cabos de chegada e saída entre o barramento e o transformador, caso ache necessário e conveniente para a obtenção das correntes de curto-circuito nesse nível de tensão.

De seguida, o utilizador deve introduzir o nível de tensão para cada barramento, pressionado para tal o botão correspondente ao nível de tensão do barramento em questão, onde irá abrir uma janela para introdução dos dados, figura 3.18. Nesta janela é permitida a seleção das unidades dos valores que se esta a inserir.

A janela intitulada "Inserir valor da Tensão" possui um botão de fechar no canto superior direito. Ela contém um campo de entrada de texto com a etiqueta "Tensão" à esquerda e unidades selecionáveis "V" e "kV" à direita. Um botão "Gravar" está localizado no canto inferior direito.

Figura 3.18 - Janela de introdução dos dados do nível de tensão em cada barramento.

Por último, o utilizador deve introduzir os valores de X/R , para cada nível de tensão, pressionado para tal o botão correspondente ao X/R do nível de tensão questão, abrindo uma janela para introdução dos valores, figura 3.19.

A janela intitulada "Inserir valor de X/R" possui um botão de fechar no canto superior direito. Ela contém um campo de entrada de texto com a etiqueta "X/R" à esquerda e um botão "Gravar" no canto inferior direito.

Figura 3.19 - Janela de introdução do valor de X/R .

De modo a evitar impossibilidades técnicas, apenas é permitido ao utilizador a seleção de um caminho, não podendo estar simultaneamente selecionado o caminho por um transformador e por um cabo. Supondo que o utilizador tem ativo um cabo para transição entre barramentos, figura 3.20 e 3.21, a ferramenta não permitirá que o utilizador ative o transformador como transição entre o mesmo barramento, surgindo uma mensagem de erro, figura 3.22. O mesmo, acontecerá, caso o utilizador tenha ativo um transformador como transição entre barramentos, figura 3.23 e 3.24, não será possível ativar o cabo como transição no mesmo barramento, figura 3.25.

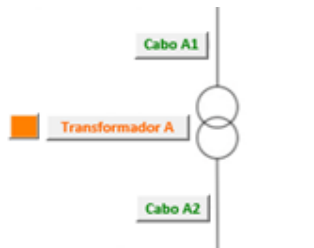


Figura 3.20 - Caminho pelo Cabo P selecionado.

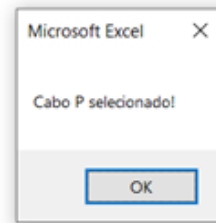


Figura 3.21 - Mensagem de seleção do Cabo P.

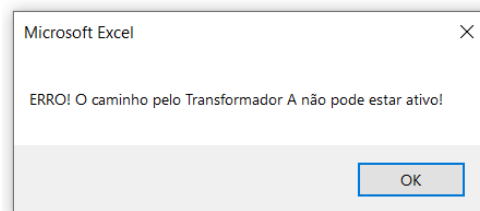


Figura 3.22 - Mensagem de erro caso o utilizador tente ativar o caminho pelo Transformador A com o caminho pelo Cabo P ativo.

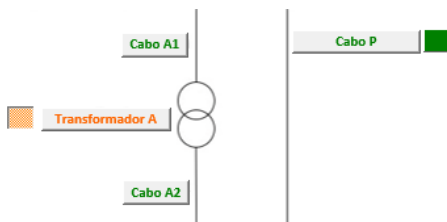


Figura 3.23 - Caminho pelo Transformador A selecionado.

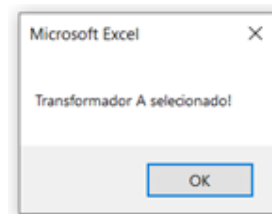


Figura 3.24 - Mensagem de seleção do Transformador A.

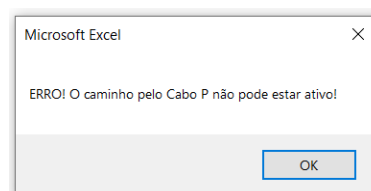


Figura 3.25 - Mensagem de erro caso o utilizador tente ativar o caminho pelo Cabo P com o caminho pelo Transformador A ativo.

Além das impossibilidades técnicas e das respetivas mensagens de erro apresentadas, foram ainda previstos outros erros comuns, como a colocação de valores negativos, figura 3.26, a colocação de texto em vez de números, figura 3.27, a não introdução de unidades, figura 3.28 e a não seleção de algum parâmetro das opções disponíveis, tentando prosseguir, figura 3.29, surgindo em todos estes casos mensagens de erro, impedindo a ferramenta de continuar a operar até que o utilizador proceda a correção dos erros ou seleção das opções disponíveis.

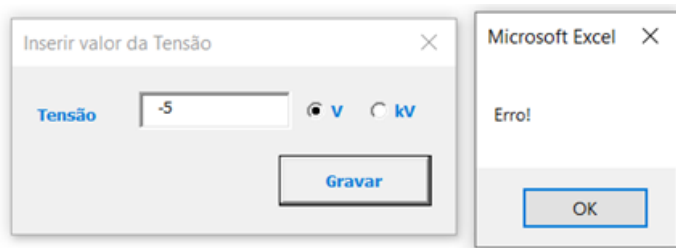


Figura 3.26 - Mensagem de erro caso o utilizador tente gravar um número negativo para o valor de um nível de tensão.

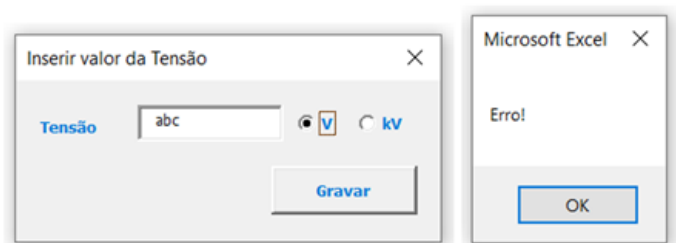


Figura 3.27 - Mensagem de erro caso o utilizador tente gravar texto para o valor de um nível de tensão.

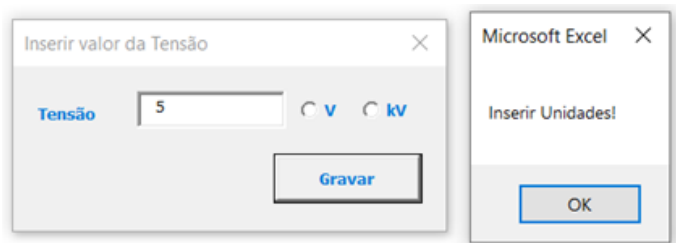


Figura 3.28 - Mensagem de erro caso o utilizador tente gravar sem inserir as unidades.

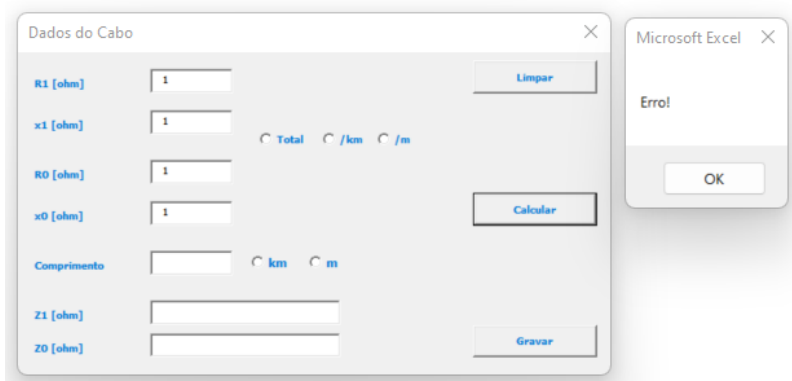


Figura 3.29 - Mensagem de erro caso o utilizador não selecione nenhuma opção disponível.

A medida que os valores vão sendo inseridos e calculados, os mesmo irão aparecer visíveis no final do separador REDE da ferramenta, possibilitando a sua consulta ao utilizador, figuras 3.30, 3.31, 3.33, 3.34.

Rede	
Tensão [kV]	0
S" [MVA]	0

Figura 3.30 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre a rede.

Cabo L	
R1 [Ω]	0
X1 [Ω]	0
R0 [Ω]	0
X0 [Ω]	0
Comprimento [m]	0
Z1 [Ω]	0
Z0 [Ω]	0

Figura 3.31 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre o respetivo cabo, neste caso, Cabo L.

Transformador A	
Potência [MVA]	0
Tensão do Primário [kV]	0
Tensão do Secundário [kV]	0
Z [%]	0

Figura 3.32 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre o respetivo transformador, neste caso, Transformador A.

Nível	Tensão [kV]
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

Figura 3.33 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre a tensão para cada nível correspondente.

Nível	X/R
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

Figura 3.34 - Tabela onde irão surgir os dados introduzidos sobre a relação X/R .

3.4.1.4 - Resultados

O quarto separador visível para o utilizador, tal como o próprio nome indica, apresenta os resultados calculados dos valores das correntes de curto-circuito. Estes encontram-se divididos por 5 tabelas, correspondentes aos valores das correntes calculadas para cada um dos 5 barramentos apresentados, figura 3.35. O valor da tensão inserido para cada barramento aparece automaticamente na tabela do nível correspondente.

60 [kV]	Resultados dos Cálculos de curto-circuito - Nível tensão 1							
	Máximo				Mínimo			
	Trifásico	Fase - Terra	Fase - Fase	Fase - Fase - Terra	Trifásico	Fase - Terra	Fase - Fase	Fase - Fase - Terra
Curto-Circuito								
I''_k [kA]								
I_p [kA]								
I_b [kA]								
I_k [kA]								

Figura 3.35 - Tabela com o resultado das correntes de curto-circuito calculadas para o nível de tensão correspondente.

Estas tabelas são preenchidas automaticamente procedendo como anteriormente explicado para a obtenção das correntes de curto-circuito para o nível pretendido.

Caso algum dos valores da corrente de curto-circuito apareça com o valor zero, significa que a ferramenta não possui os dados necessários para o cálculo da corrente de curto-circuito pretendida. Por exemplo, se o utilizador não introduzir a relação X/R , os valores das correntes de curto-circuito que necessitem desse parâmetro para ser calculadas, irão surgir com o valor zero e o mesmo acontecerá se o utilizador não inserir a impedância de sequência zero, Z_0 , essencial para o cálculo da corrente de curto-circuito entre uma ou mais fases e a terra.

3.4.1.5 - Auxiliar

O último separador encontra-se oculto para o utilizador comum e nele figuram diversos dados auxiliares para a correta execução da ferramenta, bem como formulações matemáticas para determinação de parâmetros.

Para efetuar o cálculo das correntes de curto-circuito, é utilizado o teorema de *Thévenin*, ou seja, é efetuada uma redução da rede a montante até ao local onde se pretende calcular o curto-circuito, traduzida numa impedância equivalente e numa fonte de tensão figura 3.36.

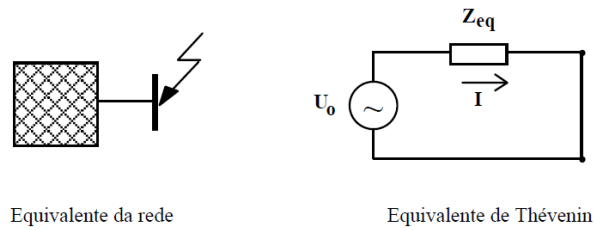


Figura 3.36 - Circuito visto do ponto de defeito [3].

Esta impedância equivalente corresponde à soma sucessiva de impedâncias até ao local de defeito, no caso da ferramenta, a impedância equivalente até cada um dos barramentos, sendo os seus valores armazenados no separador auxiliar, figura 3.67, mediante este corresponder à impedância de um cabo ou de um transformador.

z1 (1)	z0 (1)
0	0

z1 (2)	z0 (2)
0	0

z1 (3)	z0 (3)
0	0

z1 (4)	z0 (4)
0	0

z1 (5)	z0 (5)
0	0

Figura 3.37 - Tabelas de armazenamento da impedância equivalente vista de cada barramento.

Neste separador, encontram-se ainda tabelas automáticas de atribuição do fator de tensão c , de acordo com a tensão inserida para cada nível de tensão da ferramenta, fundamental para a obtenção das correntes de curto-circuito.

Aux 1 [c]		
Tensão	Máximo	Mínimo
0,4	1,05	0,95

Aux 2 [c]		
Tensão	Máximo	Mínimo
15	1,1	1

Figura 3.38 - Tabelas de seleção do fator de tensão de acordo com a tensão em cada nível.

Por último, figuram ainda neste separador tabelas com a relação X/R e o respetivo k após calculado, figura 3.39.

X/R (1)	k [X/R] (1)
0	0

X/R (2)	k [X/R] (2)
0	0

X/R (3)	k [X/R] (3)
0	0

X/R (4)	k [X/R] (4)
0	0

X/R (5)	k [X/R] (5)
0	0

Figura 3.39 - Tabelas de armazenamento da relação X/R e cálculo do respectivo k .

3.5 - Teste Funcional

Depois de todo o processo de desenvolvimento da ferramenta estar concluído, foram realizados intensivamente diversos testes funcionais, não numéricos, para verificar se todas as opções disponíveis na ferramenta funcionavam corretamente.

Estes testes funcionais passaram pela verificação de todos os botões disponíveis, e se a respectiva função estava correta quando pressionados, isto é, se a *macro* a eles atribuída estava correta.

Outro teste realizado foi a introdução de valores negativos e texto de modo a comprovar que a ferramenta era capaz de reconhecer como erro os dados inseridos. Também a tentativa de seleção de duas ou mais opções disponíveis nas janelas, isto é, a tentativa de seleção das duas unidades presentes na introdução dos dados, como por exemplo, figura 3.18. Assim que o utilizador selecionava uma unidade a outra era automaticamente anulada.

Por último, a ferramenta foi testada por um terceiro utilizador, na medida em que foi possível apurar o seu intuitivo modo de operar, não tendo sido apresentada nenhuma dúvida nem nenhuma dificuldade no seu funcionamento, sendo possível avançar para a etapa seguinte.

3.6 - Validação da ferramenta

Depois de concluídas com sucesso todas as etapas anteriores a ferramenta necessitava de uma validação quando confrontada com a sua principal funcionalidade, a obtenção das correntes de curto-circuito para diversos barramentos.

Assim, ficou definido que a mesma iria ser testada em exercícios simples de contexto universitário, aumentado sucessivamente a complexidade dos mesmos, até chegar a grandes projetos de engenharia onde poderia ser empregue.

Os resultados dos testes que serviram de suporte para a validação do 4C's encontram-se expostos no capítulo 4.

3.7 - Apresentação da ferramenta

Após a validação da ferramenta foi realizada uma breve apresentação da mesma a todos os colaboradores da secção de alta tensão da QUADRANTE, explicando o princípio da mesma e o modo de operar.

Nesta apresentação foi demonstrado o poder da ferramenta num projeto onde a QUADRANTE teve uma participação, permitindo obter as correntes de curto-circuito necessárias ao avanço do projeto, evitando a paragem do mesmo, pois toda a equipa da secção de alta tensão foi capaz de rapidamente obter os resultados pretendidos, ao invés de aguardar pelos resultados vindo de terceiros.

3.8 - Considerações finais

A ferramenta desenvolvida procurou dar resposta ao problema apresentado.

O 4C's opera fundamentalmente em 4 separadores, com um separador auxiliar não estando este último visível para o utilizador comum.

No primeiro separador, APRESENTAÇÃO, são visíveis diversos dados do seu criador, bem como um espaço para o utilizador inserir os seus dados e onde a ferramenta irá ser utilizada.

No segundo separar, INSTRUÇÕES, são apresentadas todas as funcionalidades de todos os botões disponíveis bem como um conjunto de regras de operação da ferramenta.

O terceiro separador, REDE, é o separador onde o utilizador interage com a ferramenta, através da introdução de dados e escolha de caminhos com vista a obtenção das correntes de curto-circuito no barramento que pretender.

No último separador visível são apresentados os valores das correntes de curto-circuito para cada nível de tensão, podendo os resultados ser exportados para um documento *PDF*.

O separador auxiliar não se encontra visível para o utilizador comum e serve de suporte ao correto funcionamento da ferramenta.

Capítulo 4

Validação de resultados com recurso ao 4C's

Neste capítulo são apresentados dois casos fundamentais com o intuito de proceder à validação da ferramenta 4C's, através de uma análise comparativa com resultados previamente conhecidos.

4.1 - Exercício simples de obtenção das correntes de curto-circuito

Numa primeira fase de validação da ferramenta desenvolvida, a mesma foi testada para alguns exercícios simples, apresentados no decorrer do contexto académico, como o cálculo de correntes de curto-circuito em linhas e em sistemas compostos por uma linha e um transformador.

Os resultados obtidos para as correntes de curto-circuito através do 4C's foram iguais aos previamente conhecidos, ficando validado o seu funcionamento nesta primeira fase.

4.2 - Projetos reais de Engenharia

Numa segunda fase, a ferramenta foi utilizada em projetos reais de engenharia, com a finalidade de obtenção das correntes de curto-circuito nos barramentos do projeto. Para tal, foram calculadas as correntes de curto-circuito nos três primeiros barramentos do projeto da Central Solar Fotovoltaica de Esteveira, com valores de 60 kV nos dois primeiros e de 30 kV no último barramento [11][12].

No primeiro barramento da central, os valores das correntes de curto-circuito calculados pelo 4C's foram exatamente iguais aos resultados previamente conhecidos [10].

No segundo barramento de 60 kV os resultados obtidos foram bastante próximos dos previamente conhecidos, podendo estes valores serem considerados aceitáveis, figura 3.39 e 3.40 [11][12].

60 [kV]		Resultados dos Cálculos de curto-circuito - Nível tensão 2							
Curto-Circuito		Máximo				Mínimo			
		Trifásico	Fase - Terra	Fase - Fase	Fase - Fase - Terra	Trifásico	Fase - Terra	Fase - Fase	Fase - Fase - Terra
I''_k [kA]		4,15	1,94	3,59	3,71	3,77	1,86	3,26	3,44
I_p [kA]		6,90	3,23	5,97	6,17	6,72	3,31	5,82	6,13
I_b [kA]		-	1,94	3,59	3,71	-	1,86	3,26	3,44
I_k [kA]		4,15	1,94	3,59	3,71	3,77	1,86	3,26	3,44

Figura 3.39 - Resultados obtidos com recurso ao 4C's para determinar as correntes de curto-circuito.

	Maximum				Minimum			
	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$	$\Phi-\Phi-\Phi$	$\Phi-T$	$\Phi-\Phi$	$\Phi-\Phi-T^*$
I''_k [kA]	4,088	1,867	3,452	3,639	3,685	1,774	3,192	3,349
i_p [kA]	6,801	3,106	5,743	6,055	6,593	3,173	5,709	5,991
I_b [kA]	-	1,867	3,452	3,639	-	1,774	3,192	3,349
I_k [kA]	4,088	1,867	3,452	3,639	3,685	1,774	3,192	3,349

Figura 3.40 - Resultados previamente conhecidos das correntes de curto-circuito [10].

Para o barramento de 30 kV os resultados foram semelhantes aos obtidos para o barramento de 60kV, permitindo assim a validação da ferramenta.

Estimou-se que esta diferença entre resultados poderá dever-se à presença de outros elementos no projeto que não figuram na ferramenta desenvolvida, como o caso de inversores, cuja presença afeta as correntes de curto-circuito.

Assim, ficou definido que a ferramenta desenvolvida irá servir de recurso ao projetista, na execução de projetos de linhas e subestações, elementos para os quais a ferramenta apresentou um funcionamento satisfatório.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 - Conclusões

O desenvolvimento do presente trabalho surgiu da necessidade da empresa QUADRANTE possuir uma ferramenta própria de cálculo das correntes de curto-circuito, que pudesse auxiliar o projetista na execução de projetos de engenharia, evitando a dependência de terceiros para obter, na maioria das vezes, um resultado simples, mas de extrema importância para o avanço do projeto, aumentando a eficiência durante o tempo da sua execução.

Apesar da existência de diversas aplicações informáticas disponíveis no mercado para o mesmo efeito, muitas vezes, as suas licenças de utilização são bastante dispendiosas, visto a grande amplitude de funcionalidades que possuem, sendo na maioria dos casos desnecessárias para o projetista. Estas aplicações são, também, bastantes complexas e complicadas de utilizar, sendo necessário, na maior parte das vezes, uma formação extra para perceber o seu modo de funcionamento.

O desafio consistiu, portanto, no desenvolvimento de uma ferramenta que permitisse obter os valores dos diversos tipos de correntes de curto-circuito máximas e mínimas num determinado ponto de uma instalação elétrica.

Para dar resposta ao problema colocado, foi efetuado um estudo intensivo da norma *IEC 60909*, padrão internacional para o cálculo das correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos de corrente alternada, bem como todos os conceitos relacionados com curto-circuitos, de forma a obter os valores das correntes de curto-circuito.

Além disso, foi ainda efetuado um estudo da linguagem de programação *Visual Basic for Applications*, linguagem utilizada pelo *Microsoft Office Excel*, para a criação de ferramentas e programas na aplicação.

Perante o problema apresentando, é possível concluir que o principal objetivo proposto foi cumprido.

A ferramenta desenvolvida permite uma interação simples com o utilizador, obtendo os resultados pretendidos e para os quais foi desenvolvida. Tais resultados são apresentados de forma simples e clara, possibilitando a rápida consulta de valores.

Esta ferramenta opera de forma dinâmica, na medida em que não é necessário inserir todos os parâmetros de uma dada instalação, caso seja necessário atualizar apenas um dado, basta alterar o necessário e efetuar novamente os cálculos.

Por último, todo o processo de desenvolvimento desta dissertação permitiu um aprofundamento de conhecimentos na área de curto-circuitos, bem como a aprendizagem de uma nova linguagem de programação e o conhecimento de novas funcionalidades do *Microsoft Office Excel*.

5.2 - Trabalho Futuro

Como perspectiva de trabalho futuro referente ao tema desta dissertação e a ferramenta de cálculo desenvolvida, fica a sugestão da adição de novas funcionalidades, nomeadamente a criação de bases de dados com os mais diversos tipos de condutores e respetivas características, bem como transformadores, evitando a necessidade de o utilizador inserir manualmente as características dos equipamentos.

Por outro lado, uma mais-valia para a ferramenta desenvolvida, será a expansão da rede apresentada, permitindo obter os valores das correntes de curto-circuito em mais locais.

Por último, seria interessante que a ferramenta permitisse verificar se a corrente de curto-circuito calculada num ponto, está dentro dos parâmetros impostos ao projetista. Para tal, seria necessário adicionar um comparador entre a corrente de curto-circuito calculada e a máxima permitida para esse local.

Referências

- [1] J. Paiva, *Redes de Energia Eléctrica: Uma Análise Sistémica*, 4th editio. IST Press, 2015.
- [2] “IEC 60909-0: Short circuit currents in three-phase a.c. systems,” 2001.
- [3] M. A. Matos, “Introdução ao Cálculo de Curto-Circuitos Trifásicos Simétricos pela norma CEI-909,” 1996.
- [4] J. R. Ferreira, “Curto-Circuitos,” *FEUP - DEEC*, 2017.
- [5] REN, “Valores previstos para as correntes de defeito no nível de tensão de 150kV da subestação de Portimão,” 2020.
- [6] Microsoft, “Programação com a API de C no Excel,” 2022. <https://learn.microsoft.com/pt-pt/office/client-developer/excel/programming-with-the-c-api-in-excel> (accessed Apr. 18, 2022).
- [7] Microsot, “Introdução ao VBA no Office,” 2022. <https://learn.microsoft.com/pt-pt/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office> (accessed Apr. 20, 2022).
- [8] J. Manuel and R. S. Tavares, “Visual Basic I-Introdução à Programação e ao Visual Basic,” 2009.
- [9] Microsoft, “Objeto UserForm,” 2022. <https://learn.microsoft.com/pt-pt/office/vba/language/reference/user-interface-help/userform-object> (accessed Apr. 21, 2022).
- [10] A. Salvado, “Esteveira Solar Plant,” 2021.
- [11] Quadrante, “Esquema unifilar geral da central solar fotovoltaica de Esteveira,” 2021.
- [12] Quadrante, “Esquema unifilar geral da subestação da central solar fotovoltaica de Esteveira,” 2021.