

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Desenvolvimento de uma Ferramenta de Apoio ao
Projecto de Instalações Eléctricas BT**

André Quintino Alves Pereira

VERSÃO FINAL

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

Orientador: Prof. Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa
Co-orientador: Eng.º Victor Paulo Barreira Ribeiro

Julho de 2011

Resumo

Este documento corresponde ao relatório de dissertação do “Desenvolvimento de uma Ferramenta de Apoio ao Projecto de Instalações Eléctricas BT”, no âmbito do projecto final do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (Major Energia), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O dimensionamento de correntes de curto-circuito é um procedimento, que para além de assumir alguma complexidade, é bastante moroso e trabalhoso, pois envolve a realização de numerosos cálculos. Surge então a necessidade de desenvolver uma aplicação informática capaz de dimensionar as correntes de curto-circuitos de forma automática, permitindo otimizar o tempo de elaboração de um projecto eléctrico.

Este documento descreve o processo de elaboração desse software, tendo abordado todos os tipos de curto-circuitos possíveis e considerados pelas normas da Comissão Electrotécnica Internacional.

Abstract

This document corresponds to the report of the dissertation "Development of a Support Tool to LV Electrical Installations Projects," in the final thesis of the Integrated Masters in Electrotechnical and Computer Engineering (Major Energy), Engineering College, University of Porto.

The dimensioning of short circuit currents is a complex, time consuming and laborious which involves performing numerous calculations. As such, there was the need to develop a software application capable of dimensioning short-circuit currents automatically, allowing the optimization of the lead time of the electrical project.

This document describes the process of developing this software, having addressed all types of short circuits considered by the International Electrotechnical Commission standards.

Agradecimentos

Aos meus pais e irmão, que embora não haja palavras para descrever o quanto eu estou agradecido pelo apoio incondicional, pela confiança depositada, pelo orgulho, pelas palavras amigas e conselhos nos momentos mais difíceis, o meu MUITO OBRIGADO.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa, pela amizade, pela disponibilidade, apoio e dedicação durante a realização da dissertação.

A todos os colaboradores conhecidos da FASE - Estudos e Projectos S.A., pelos conhecimentos partilhados, pelo apoio, pelas palavras amigas e pelo material disponibilizado para a elaboração da dissertação. Em especial ao Eng.º Paulo Santos.

Ao Eng.º Victor Paulo Barreira Ribeiro, pela confiança depositada, pelo apoio e pela ajuda disponibilizada na realização da dissertação.

Aos meus amigos e companheiros de casa, Henrique Teixeira e Tiago da Rocha, pela companhia durante 5 anos, pelas palavras amigas, pelos momentos de alegria partilhados e acima de tudo pela amizade.

A todos os meus amigos que conheci na faculdade, em especial àqueles que sempre me apoiaram com conhecimentos partilhados, palavras de conforto e amizade. Destaco, devido a uma maior convivência durante todo o meu percurso académico, o Alexandre Roças, o Armando Pontes, o Miguel Gomes e o Tiago Ramos.

Muito obrigado a todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação.

Índice

Resumo.....	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas.....	xvii
Abreviaturas e Símbolos.....	xix
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Objectivos	1
1.3 - Estrutura da Dissertação	2
Capítulo 2.....	5
Ferramentas de Apoio ao Projecto de Instalações Eléctricas de BT	5
2.1 - Introdução	5
2.2 - Ferramentas Informáticas.....	6
2.2.1 - My Ecodial L 3.4.....	6
2.2.2 - ID-Spec Large 3.1	8
2.2.3 - DocWin 3.0.....	10
2.2.4 - SIMARIS design 6.0	12
2.3 - Conclusões.....	13
Capítulo 3.....	15
Curto-Circuitos	15
3.1 - Introdução	15
3.2 - Definições	16
3.3 - Desenvolvimento da corrente de curto-circuito	17
3.3.1 - Curto-circuito afastado dos alternadores	18
3.3.2 - Curto-circuito próximo dos alternadores.....	20
3.4 - Considerações.....	23
3.5 - Método de cálculo	24
3.5.1 - Fonte de tensão equivalente no local de defeito	24

3.5.2 - Aplicação das componentes simétricas	25
3.5.3 - Correntes de curto-circuito máximas	27
3.5.4 - Correntes de curto-circuito mínimas	27
3.5.5 - Impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico.....	28
3.5.5.1 - Rede	29
3.5.5.2 - Transformadores.....	31
3.5.5.3 - Cabos/Condutores	34
3.5.5.4 - Geradores Síncronos (Alternadores)	34
3.5.5.5 - Grupos de Produção com Tomadas de Regulação de Tensão em Carga	37
3.5.5.6 - Grupos de Produção sem Tomadas de Regulação de Tensão em Carga	38
3.5.5.7 - Motores Assíncronos.....	39
3.5.6 - Cálculo das correntes de curto-circuito.....	40
3.5.6.1 - Generalidades	40
3.5.6.2 - Curto-Circuito Trifásico Simétrico	42
3.5.6.3 - Curto-Circuito Fase-Fase (Bifásico)	44
3.5.6.4 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra.....	46
3.5.6.5 - Curto-Circuito Fase-Terra (Monofásico)	47
3.6 - Síntese	48
Capítulo 4.....	53
Ferramenta de Cálculo	53
4.1 - Software Desenvolvido	53
4.1.1 - Introdução.....	53
4.1.2 - Inicialização do <i>calcicc</i>	54
4.1.2.1 - Criar um novo projecto	54
4.1.2.2 - Abrir um projecto já existente	54
4.1.3 - Apresentação	55
4.1.3.1 - Barra de Menu.....	55
4.1.3.2 - Barra de Ferramentas.....	56
4.1.4 - Esquema Unifilar	56
4.1.4.1 - Adicionar Equipamentos.....	56
4.1.4.2 - Incrementar/Decrementar Equipamentos	61
4.1.4.3 - Remover Equipamentos.....	61
4.1.4.4 - Características dos Equipamentos	62
4.1.5 - Relatório Final	70
4.1.6 - Fluxogramas do Programa Desenvolvido	71
4.2 - Conclusões	74
Capítulo 5.....	77
Aplicação da Ferramenta Desenvolvida	77
5.1 - Exemplo Teste 1.....	77
5.1.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica	78
5.1.2 - Dados do Problema.....	78
5.1.3 - Resultados Obtidos com o <i>calcicc</i>	80
5.2 - Exemplo Teste 2.....	82
5.2.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica	82
5.2.2 - Dados do Problema.....	83
5.2.3 - Resultados Obtidos com o <i>calcicc</i>	85
5.3 - Exemplo Teste 3.....	87
5.3.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica	87
5.3.2 - Dados do Problema.....	88
5.3.3 - Resultados Obtidos com o <i>calcicc</i>	89
5.4 - Exemplo Tipo	90
5.4.1 - Especificação do Problema	90
5.4.2 - Aplicação do <i>calcicc</i>	91
Capítulo 6.....	93
Conclusões	93

Referências.....	95
Anexo A	97
Anexo B	101
Anexo C	111
Anexo D	125

Lista de figuras

Figura 2.1 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “My Ecodial L 3.4” - painel de interactividade com o utilizador.	7
Figura 2.2 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “ID-Spec Large 3.1” - painel de interactividade com o utilizador.	8
Figura 2.3 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “DocWin 3.0” - painel de interactividade com o utilizador.	11
Figura 2.4 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “SIMARIS design 6.0” - painel de interactividade com o utilizador.	13
Figura 3.1 - Diagrama simplificado da rede[16].	17
Figura 3.2 - Evolução da corrente de curto-circuito, quando o defeito ocorre longe dos alternadores[15].	18
Figura 3.3 - Representação gráfica e decomposição do curto-circuito longe dos alternadores[16].	19
Figura 3.4 - Desenvolvimento do curto-circuito simétrico[16].	20
Figura 3.5 - Desenvolvimento do curto-circuito assimétrico[16].	20
Figura 3.6 - Evolução da corrente de curto-circuito, quando o defeito ocorre perto dos alternadores[15].	20
Figura 3.7 - Corrente de curto-circuito total i_{sc} (e) e contribuição das suas componentes[16].	22
Figura 3.8 - Esquema unifilar do sistema[15].	25
Figura 3.9 - Modelo equivalente do sistema, para o sistema de sequência positiva[15].	25
Figura 3.10 - Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência positiva $Z(1)$ [15]. ..	26
Figura 3.11 - Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência negativa $Z(2)$ [15]. .	26
Figura 3.12 - Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência zero $Z(0)$ [15].	26
Figura 3.13 - Esquema unifilar da rede de alimentação[15].	30

Figura 3.14 - Modelo equivalente da rede de alimentação[15].	30
Figura 3.15 - Esquema unifilar da rede de alimentação em série com um transformador[15].	31
Figura 3.16 - Modelo equivalente da rede de alimentação em série com um transformador[15].	31
Figura 3.17 - Esquemas unifilares equivalentes de transformadores, para o sistema de sequência positiva e zero [21].	33
Figura 3.18 - Esquemas unifilares equivalentes de transformadores, para o sistema de sequência zero [22].	34
Figura 3.19 - Curto-circuito alimentado directamente por um gerador[15].	35
Figura 3.20 - Diagrama fasorial de um gerador síncrono em condições estipuladas[15].	35
Figura 3.21 - Esquemas unifilares equivalentes de geradores, para o sistema de sequência positiva negativa e zero[22].	37
Figura 3.22 - Curto-circuito alimentado por um grupo de produção (gerador e transformador com ou sem tomadas de regulação de tensão em carga)[15].	38
Figura 3.23 - Gráfico que permite determinar o tipo de curto-circuito que leva ao valor mais elevado da corrente de inicial simétrica de curto-circuito, no local de ocorrência do defeito, quando o ângulo das impedâncias Z_1 , Z_2 , Z_0 são idênticos[15].	40
Figura 3.24 - Exemplo de uma rede não emalhada[15].	41
Figura 3.25 - Curto-circuito trifásico simétrico[16].	42
Figura 3.26 - Curto-circuito trifásico simétrico no barramento i ($Z_{def} = 0$ para curto-circuito franco)[10].	42
Figura 3.27 - Variação do factor k em função da razão R/X ou X/R [15].	44
Figura 3.28 - Curto-circuito fase-fase (bifásico)[16].	44
Figura 3.29 - Curto-circuito fase-fase-terra[16].	46
Figura 3.30 - Curto-Circuito Fase-Terra (Monofásico)[16].	47
Figura 4.1 - Formulário inicial do <i>calcicc</i> .	54
Figura 4.2 - Formulário para definir os dados do projecto.	54
Figura 4.3 - Formulário principal do <i>calcicc</i> .	55
Figura 4.4 - Parte superior do formulário principal do <i>calcicc</i> .	55
Figura 4.5 - Grupo: Fontes de Alimentação.	57
Figura 4.6 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT.	57
Figura 4.7 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de BT.	58

Figura 4.8 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT em paralelo com um Grupo de Produção a produzir na MT.	58
Figura 4.9 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT socorrida por um Grupo de Socorro a produzir na MT.	58
Figura 4.10 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT em paralelo com um Gerador a produzir na BT.	59
Figura 4.11 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT socorrida por um Grupo de Socorro a produzir na BT.	59
Figura 4.12 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de BT socorrida por um Grupo de Socorro a produzir na BT.	59
Figura 4.13 - Grupo: Grupos de Produção na MT.	60
Figura 4.14 - Grupo: Transformadores (PT's).	60
Figura 4.15 - Grupo: Geradores na BT.	60
Figura 4.16 - Grupo: Motores.	61
Figura 4.17 - Exemplo de como adicionar grupos de produção na folha de desenho do <i>calcicc</i>	61
Figura 4.18 - Folha de desenho do formulário principal do <i>calcicc</i> : clique sobre a Rede.	62
Figura 4.19 - Características da Rede de MT.	62
Figura 4.20 - Características da Rede de BT.	63
Figura 4.21 - Características do(s) transformador(es) MT/BT.	64
Figura 4.22 - Base de Dados dos transformadores.	64
Figura 4.23 - Características do(s) transformador(es) BT/MT.	65
Figura 4.24 - Características do geradores a produzir na MT.	66
Figura 4.25 - Formulário de ajuda ao cálculo da potência aparente estipulada do gerador. ..	67
Figura 4.26 - Características do geradores a produzir na BT.	68
Figura 4.27 - Características dos motores assíncronos.	68
Figura 4.28 - Características dos cabos/condutores.	69
Figura 4.29 - Formulário de ajuda ao cálculo da resistência do cabo/condutor, à temperatura máxima de curto-circuito.	70
Figura 4.30 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE.	71
Figura 4.31 - Algoritmo de cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico, implementado no <i>calcicc</i>	72
Figura 4.32 - Algoritmo de cálculo dos curto-circuitos simétricos/assimétricos, implementado no <i>calcicc</i>	73

Figura 4.33 - Modo de funcionamento do <i>calcicc</i>	74
Figura 5.1 - Esquema unifilar da instalação eléctrica do Exemplo Teste 1.	78
Figura 5.2 - Exemplo Teste 1: Rede de MT a funcionar em paralelo com os Geradores a produzir na BT - Rede c/Autoprodução.	79
Figura 5.3 - Exemplo Teste 1: Rede de MT socorrida pelos Grupos de Socorro a produzir na BT - Rede c/Socorrido.	80
Figura 5.4 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: contribuição da Rede de MT a funcionar em paralelo com os Geradores a produzir na BT.	80
Figura 5.5 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição da Rede de MT. ..	81
Figura 5.6 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição dos Grupos de Socorro a produzir na BT.	81
Figura 5.7 - Esquema unifilar da instalação eléctrica do Exemplo Teste 2.	82
Figura 5.8 - Exemplo Teste 2: Rede de MT a funcionar em paralelo com os Grupos de Produção a produzir na MT - Rede c/Autoprodução.....	84
Figura 5.9 - Exemplo Teste 2: Rede de MT socorrida pelos Grupos de Socorro a produzir na MT - Rede c/Socorrido.	85
Figura 5.10 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: contribuição da Rede de MT a funcionar em paralelo com os Grupos de Produção a produzir na MT.....	85
Figura 5.11 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição da Rede de MT.	86
Figura 5.12 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição dos Grupos de Socorro a produzir na MT.....	86
Figura 5.13 - Esquema unifilar da instalação eléctrica do Exemplo Teste 3.	87
Figura 5.14 - Exemplo Teste 3 exposto no <i>calcicc</i>	89
Figura 5.15 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Exemplo Teste 3.....	89

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Níveis de criticidade das cargas no programa “ID-Spec Large 3.1”[4].	9
Tabela 3.1 - Factor de tensão c (tabela de acordo com a norma IEC 60909-0).	29
Tabela 3.2 - Síntese de fórmulas para o cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico.	48
Tabela 3.3 - Síntese de fórmulas para o cálculo dos diferentes tipos de curto-circuitos simétricos e assimétricos.	51
Tabela 4.1 - Itens do menu Ficheiro.....	55
Tabela 4.2 - Itens do menu Editar.	56
Tabela 4.3 - Itens do menu Dimensionar.	56
Tabela 4.4 - Ícones da barra de ferramentas.	56
Tabela 4.5 - Opções do grupo: Fontes de Alimentação.....	57
Tabela 4.6 - Opções do grupo: Grupos de Produção na MT.	60
Tabela 4.7 - Opções do grupo: Transformadores (PT's).	60
Tabela 4.8 - Opções do grupo: Geradores na BT.	60
Tabela 4.9 - Opções do grupo: Motores.	61
Tabela 5.1 - Dados do problema do Exemplo Teste 1.	78
Tabela 5.2 - Dados do problema do Exemplo Teste 2.	83
Tabela 5.3 - Dados do problema do Exemplo Teste 3.	88

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	Corrente Alternada
BT	Baixa Tensão
F	Local onde ocorreu o curto-circuito
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
MT	Média Tensão
PT	Posto de Transformação
QGE	Quadro Geral de Entrada
RTIEBT	Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão
UPS	Unidade de Potência Ininterruptível
UTE	<i>Union Technique de l'Electricité</i>

Lista de índices

(0)	Componente de sequência zero
(1)	Componente de sequência positiva
(2)	Componente de sequência negativa
"	Valor subtransitário (inicial)
E	Terra
f	Fictício
G	Gerador
HV	Alta/Média tensão, lado de Alta/Média tensão do transformador
k ou k3	Curto-circuito trifásico
K	Impedâncias ou reactâncias calculadas com o factor de correcção, K_T , K_G , K_S ou K_{SO}
k2	Curto-circuito fase-terra
k2E resp. KE2E	Curto-circuito fase-fase-terra
L	Linha

LR	Rotor travado
LV	Baixa tensão, lado de baixa tensão do transformador
M	Motor assíncrono
$\mathbb{M}$	Sem Motor
max	Máximo
min	Mínimo
n	Valor nominal
r	Valor estipulado
S	Grupo de produção (gerador e transformador com tomadas de regulação de tensão em carga)
SO	Grupo de produção (gerador e transformador com razão de transformação constante ou sem tomadas de regulação de tensão em carga)
T	Transformador

Lista de símbolos

Z_{SC}	Impedância da rede a montante do curto-circuito trifásico
I_S	Corrente de serviço
I_{SC}	Corrente de curto-circuito no período permanente
i	Corrente (valor instantâneo)
i_{ac}	Componente alternada sinusoidal da corrente instantânea
i_{dc}	Componente aperiódica da corrente instantânea
I	Corrente (valor eficaz)
$\cos \varphi$	Factor de potência
α	Desfasamento da tensão relativamente ao instante em que ocorre o curto-circuito
w	Frequência angular
e	Força electromotriz (valor instantâneo)
E	Força electromotriz (valor eficaz)
u	Tensão (valor instantâneo)
A	Valor inicial da componente contínua da corrente de curto-circuito
$\underline{a}$	Operador complexo
a	Razão entre a corrente de curto-circuito assimétrica e a corrente de curto-circuito trifásica simétrica
c	Factor de tensão
$cU_n/\sqrt{3}$	Fonte de tensão equivalente (valor eficaz)
E''	Tensão subtransitória de uma máquina síncrona
I_k	Corrente de curto-circuito permanente
I_k''	Corrente inicial simétrica de curto-circuito (valor eficaz)
I_{LR}	Corrente de arranque de um motor assíncrono

I_r	Corrente estipulada do equipamento eléctrico
$i_{d.c.}$	Componente contínua da corrente de curto-circuito
i_p	Valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico)
p_G	Gama de regulação de tensão de um gerador
p_T	Gama de regulação de tensão de um transformador
P_{krT}	Perdas activas totais nos enrolamentos de um transformador, à corrente estipulada
P_{rM}	Potência estipulada de um motor assíncrono ($P_{rM} = S_{rM} \cos \varphi_{rM} \eta_{rM}$)
R_G	Resistência de uma máquina síncrona
R_{Gf}	Resistência fictícia de uma máquina síncrona, para o calculo de i_p
S_k''	Potência inicial simétrica de curto-circuito
S_r	Potência aparente estipulada do equipamento eléctrico
t_r	Razão de transformação de um transformador com o comutador das tomadas de regulação de tensão, na posição principal; $t_r \geq 1$
U_n	Tensão composta nominal do sistema (valor eficaz)
U_r	Tensão composta estipulada (valor eficaz)
u_{kr}	Tensão de curto-circuito de um transformador em percentagem
u_{Rr}	Componente resistiva estipulada da tensão de curto-circuito em percentagem
u_{Xr}	Componente reactiva estipulada da tensão de curto-circuito em percentagem
X_d'' resp. X_q''	Reactância subtransitória longitudinal de uma máquina síncrona e respectiva reactância subtransitória transversal (valores saturados)
Z_k	Impedância de curto-circuito para sistemas trifásicos de corrente alternada
$Z_{(1)}$	Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência positiva
$Z_{(2)}$	Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência negativa
$Z_{(0)}$	Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência zero
η	Rendimento de um motor assíncrono
k	Factor para o calculo de i_p
φ	Ângulo de fase (desfasamento da corrente em relação à tensão)
θ_e	Temperatura do condutor em graus Celcius no final da duração do curto-circuito;
$\underline{Z}_Q$	Impedância de curto-circuito da Rede;
$\underline{Z}_C$	Impedância de curto-circuito de um Cabo/Condutor;
$\underline{Z}_{QC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito da Rede e respectivo Cabo/Condutor;
$\underline{Z}_{TK}$	Impedância de curto-circuito de um Transformador, com factor de correcção;
$\underline{Z}_{TC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito de um Transformador e respectivos Cabos/Condutores;
$\underline{Z}_{GK}$	Impedância de curto-circuito de um Gerador, com factor de correcção;
$\underline{Z}_{GC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito de um Gerador e respectivo Cabo/Condutor;

$\underline{Z}_M$	Impedância de curto-circuito de um Motor Assíncrono;
$\underline{Z}_{MC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito de um Motor Assíncrono e respectivo Cabo/Condutor;
$\underline{Z}_S$	Impedância de curto-circuito de um Grupo de Produção;
$\underline{Z}_{SC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito de um Grupo de Produção e respectivos Cabos/Condutores;
$\underline{Z}_{QTC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito da Rede de MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores;
$\underline{Z}_{STC}$	Soma das impedâncias de curto-circuito do(s) Grupo(s) de Produção na MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores;
$\underline{Z}_{QSTC}$	Soma do paralelo das impedâncias de curto-circuito da Rede de MT, Grupo(s) de Produção na MT e respectivos cabos/condutores, com o(s) Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores;
I''_{kQTC}	Contribuição da Rede de MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores, para as correntes de curto-circuito iniciais;
I_{pQTC}	Contribuição da Rede de MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores, para o valor máximo instantâneo das correntes de curto-circuito;
I''_{kSTC}	Contribuição do(s) Grupo(s) de Produção na MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores, para as correntes de curto-circuito iniciais;
I_{pSTC}	Contribuição do(s) Grupo(s) de Produção na MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores, para o valor máximo instantâneo das correntes de curto-circuito;
I''_{kQSTC}	Contribuição da Rede de MT, do(s) Grupo(s) de Produção na MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores, para as correntes de curto-circuito iniciais;
I_{pQSTC}	Contribuição da Rede de MT, do(s) Grupo(s) de Produção na MT, Transformador(es) MT/BT e respectivos cabos/condutores, para o valor máximo instantâneo das correntes de curto-circuito;
I''_{kQC}	Contribuição da Rede de BT e respectivo cabo/condutor, para as correntes de curto-circuito iniciais;
I_{pQC}	Contribuição da Rede de BT e respectivo cabo/condutor, para o valor máximo instantâneo das correntes de curto-circuito;
I''_{kGC}	Contribuição do(s) Gerador(es) na BT e respectivo(s) cabo(s)/condutor(es), para as correntes de curto-circuito iniciais;
I_{pGC}	Contribuição do(s) Gerador(es) na BT e respectivo(s) cabo(s)/condutor(es), para o valor máximo instantâneo das correntes de curto-circuito;
I''_{kMC}	Contribuição do(s) Motor(es) Assíncrono(s) e respectivo(s) cabo(s)/condutor(es), para as correntes de curto-circuito iniciais;

I_{pMC}	Contribuição do(s) Motor(es) Assíncrono(s) e respectivo(s) cabo(s)/condutor(es), para o valor máximo instantâneo das correntes de curto-circuito;
I''_{ki}	Soma de todas as correntes de curto-circuito iniciais parciais, referentes a cada ramo interligado ao QGE;
I''_{kQi}	Correntes de curto-circuito iniciais, referentes ao ramo da Rede, interligada ao QGE;
I''_{kGSi}	Correntes de curto-circuito iniciais, referentes ao ramo do(s) Grupo(s) de Socorro, interligado(s) ao QGE;
I_{pi}	Soma de todos os valores máximos instantâneos das correntes de curto-circuito parciais, referentes a cada ramo interligado ao QGE;
I_{pQi}	Valores máximos instantâneos das correntes de curto-circuito, referentes ao ramo da Rede, interligada ao QGE;
I_{pGSi}	Valores máximos instantâneos das correntes de curto-circuito, referentes ao ramo do(s) Grupo(s) de Socorro, interligado(s) ao QGE;

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será feita uma introdução ao presente trabalho por forma a explicitar o enquadramento do projecto, os seus objectivos e a estrutura adoptada na sua elaboração.

1.1 - Enquadramento

Este trabalho de dissertação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores foi realizado no âmbito de uma parceria entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a empresa FASE - Estudos e Projectos S.A. (FASE).

A FASE - Estudos e Projectos S.A., fundada em 1979, baseia a sua estratégia de actuação na oferta de um serviço global de engenharia e arquitectura. Mediante a adequada combinação de conhecimentos técnicos, metodologias e experiência, assegura aos seus clientes a satisfação optimizada das suas necessidades e os benefícios decorrentes do apoio de uma das maiores empresas nacionais de engenharia. Tal facto é plenamente demonstrado pelo seu vasto currículo, que inclui inúmeras realizações de grande complexidade e dimensão, designadamente em termos de infra-estruturas, edifícios e indústria. Presentemente dispõe de, aproximadamente, 340 colaboradores qualificados e especializados nas várias áreas em que actua, assegurando ainda o acompanhamento da evolução tecnológica através de uma actualização permanente.

Uma vez que este trabalho envolveu soluções desde a média tensão até ao quadro geral de entrada (QGE) de um edifício, a sua realização implicou a comunicação com diversos colaboradores da FASE, da área e divisão de engenharia electrotécnica, para que o autor compreendesse todas as condicionantes e regras que regem o projecto das instalações eléctricas nesse âmbito.

1.2 - Objectivos

Este trabalho teve como objectivo desenvolver uma ferramenta informática que satisfizesse os seguintes requisitos:

- Capaz de determinar curto-circuitos simétricos e assimétricos, nomeadamente, o curto-circuito trifásico simétrico e os curto-circuitos assimétricos, fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra no quadro geral de entrada de um edifício;
- Pretendeu-se que esse software permitisse escolher diversas configurações de fontes de alimentação do QGE, ao nível de autoprodução e grupos de socorro na média e baixa tensão;
- Outra das funcionalidades que o programa terá que possuir será a possibilidade de acrescentar novos equipamentos eléctricos à base de dados, ficando ausente de qualquer vinculação a uma determinada marca.
- Como resultados finais, o programa teria de fornecer o valor das correntes de curto-circuito máximas e mínimas, e correntes de pico, para todos os tipos de curto-circuitos considerados. Isso permitirá ao projectista escolher o poder de corte e a sensibilidade de actuação da aparelhagem de protecção.

Nesse sentido, procedeu-se ao estudo da formulação matemática que permite calcular o valor dessas correntes de curto-circuito e que foi implementada na respectiva ferramenta de cálculo.

Actualmente, existem programas informáticos, desenvolvidos por empresas de fornecimento de material eléctrico, que efectuem parte dos procedimentos que o autor aqui se propõe a implementar. Contudo, elas detêm de algumas limitações que, por vezes, obriga o projectista a efectuar os cálculos manualmente. O objectivo deste trabalho consistiu pois em desenvolver uma ferramenta que suprimisse todas essas limitações e se adaptasse às necessidades actuais da empresa.

Esta ferramenta irá, portanto, otimizar o tempo de elaboração do projecto eléctrico, auxiliando o projectista na escolha do equipamento de protecção, sem realizar qualquer tipo de cálculo manualmente.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Para além deste capítulo introdutório, este documento é constituído por mais cinco capítulos.

No Capítulo 2, apresentaram-se algumas das ferramentas informáticas de fabricante, actualmente disponíveis, de auxílio ao projectista na elaboração de um projecto eléctrico. Fez-se uma análise comparativa entre as respectivas ferramentas, verificando as suas potencialidades e limitações, permitindo especificar melhor o porquê da elaboração do software desenvolvido pelo autor.

No Capítulo 3, procedeu-se ao estudo da metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito, recorrendo a trabalhos já elaborados na área e respeitando a norma IEC 60909-0, padrão internacional para o cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos de corrente alternada.

No Capítulo 4, é apresentada a ferramenta de cálculo desenvolvida, denominada pelo acrónimo “calcicc”. Pretendeu-se demonstrar as potencialidades do software e a sua interacção com o utilizador.

No Capítulo 5, fez-se uma análise comparativa dos resultados obtidos pela resolução, manual e com o programa desenvolvido, de três exemplos teste. Por fim, demonstrou-se a

aplicação do software a uma situação real, para esclarecer sobre as suas potencialidades no auxílio ao projectista.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, sendo também feita uma referência à perspectiva de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Ferramentas de Apoio ao Projecto de Instalações Eléctricas de BT

2.1 - Introdução

A elaboração de um projecto eléctrico é um processo moroso que envolve imensos procedimentos, sendo o dimensionamento dos dispositivos de protecção um dos mais importantes uma vez que está directamente relacionado com a exploração segura da instalação e, consequentemente, com a protecção de pessoas.

Se os cálculos não forem efectuados de forma sistemática e objectiva, podem surgir erros de cálculo que, posteriormente, poderão impor consequências graves ao nível de segurança de pessoas, custo da instalação ou credibilidade por parte do cliente em relação à empresa/projectista que elaborou o projecto, entre outras. Para evitar tais inconvenientes e com o intuito de otimizar o tempo de elaboração dos respectivos projectos eléctricos, algumas empresas de fornecimento de material eléctrico desenvolveram e foram aperfeiçoando ferramentas informáticas para efectuar os cálculos de dimensionamento de forma automática. No entanto, para o manuseamento destas, é necessário ter um nível de conhecimento adequando em matéria de instalações eléctricas, uma vez que, por exemplo, as mesmas sugerem opções de escolha e inserção de dados a que só um técnico qualificado pode responder, evitando futuros erros. Entretanto e como é previsível, atendendo a que as mesmas surgiram e foram desenvolvidas por casas fabricantes de equipamentos de manobra e protecção, como instrumento de fidelização, tais ferramentas estão orientadas para a selecção e utilização de materiais e equipamentos desses próprios fabricantes.

Tais ferramentas possuem também certas limitações técnicas que serão aqui destacadas. De facto, e para melhor delimitar e especificar o presente trabalho, propusemo-nos estudar e comparar as principais aplicações informáticas de projecto disponíveis no mercado (oferecidas pelos fabricantes) para auxílio ao projectista na elaboração de um projecto eléctrico.

A orientação deste estudo propôs-se pois clarificar o âmbito das soluções electrotécnicas contempladas por cada programa de fabricante (por exemplo, que tipo de autoprodução ligado a um certo quadro eléctrico de PT permite considerar), bem como a comodidade, e clareza de utilização e a qualidade e diversidade de resultados oferecidos.

Assim, recorrendo a tais ferramentas, será efectuado o dimensionamento de instalações eléctricas, com características que incluem todo o tipo de equipamento acomodável. O objectivo consiste pois em comparar as diversas ferramentas informáticas relativamente aos resultados obtidos e, em relação às suas potencialidades/limitações, na integração de diferentes configurações e tipos de fontes de alimentação/cargas, no esquema unifilar da respectiva instalação eléctrica.

2.2 - Ferramentas Informáticas

Após uma pesquisa no mercado nacional e internacional relativa às ferramentas informáticas anteriormente referidas e analisando cada uma delas, seleccionaram-se as mais completas, fundamentadas em normas, e de aquisição gratuita, sendo que a escolha recaiu sobre as desenvolvidas pelas empresas “Schneider Electric”, “ABB”, “SIEMENS”.

2.2.1 - My Ecodial L 3.4

O “My Ecodial L 3.4” foi desenvolvido pela empresa “Schneider Electric”. É um software que realiza eficazmente os cálculos de dimensionamento de instalações eléctricas complexas de BT em edifícios do sector terciário e industrial. Optimiza a escolha de equipamentos e auxilia na selecção dos dispositivos certos consoante as necessidades, garantindo a qualidade da instalação e a segurança das pessoas e materiais segundo as RTIEBT. É de salientar que o software foi comprovado pela UTE[1].

Para analisar o comportamento do “My Ecodial L 3.4” e avaliar as suas potencialidades/limitações, recorreu-se ao mesmo para dimensionar a instalação eléctrica que se apresenta na Figura 2.1.

Examinando a Figura 2.1, verificar-se que com “My Ecodial L 3.4” é possível construir esquemas eléctricos facilmente.

Relativamente a fontes de alimentação, este permite acomodar no respectivo esquema unifilar:

- A rede de BT;
- Transformadores MT/BT (PT's);
- A rede de BT socorrida por grupos de socorro a produzir na BT;
- Transformadores MT/BT (PT's) em paralelo com grupos de socorro a produzir na BT;
- Grupos de geradores a produzir na BT, alimentando a instalação eléctrica individualmente (autoprodução);
- Bateria de condensadores.

Em relação a cargas, o “My Ecodial L 3.4” admite a integração de cargas gerais (sem designação específica), motores, iluminação e tomadas de uso gerais.

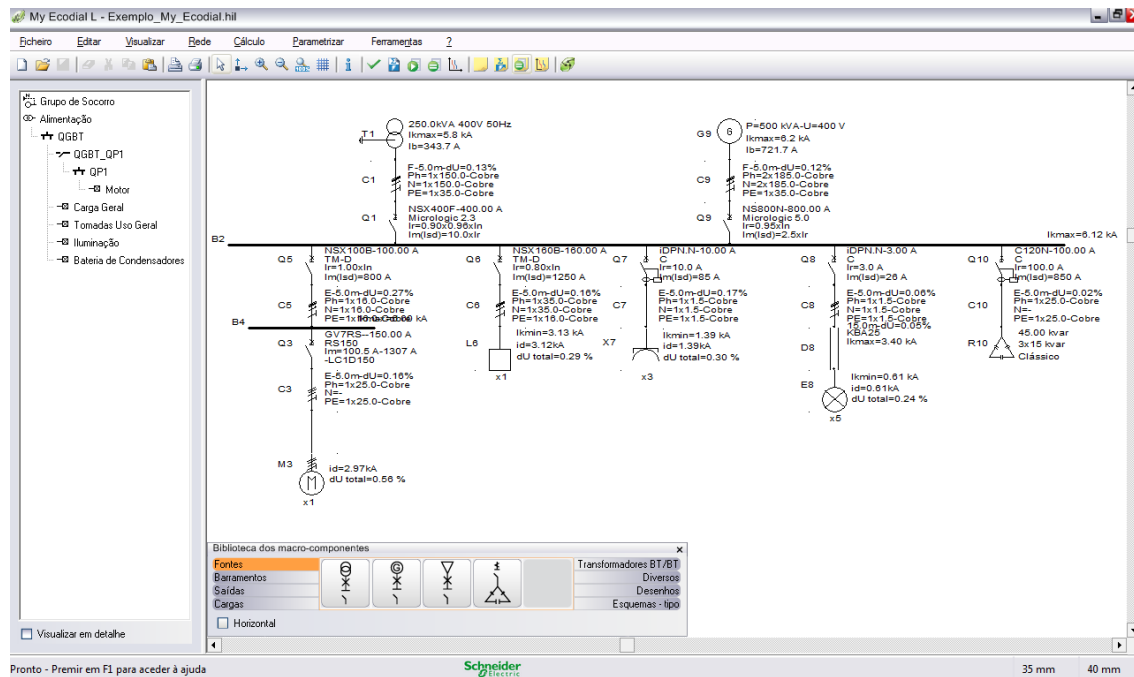


Figura 2.1 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “My Ecodial L 3.4” - painel de interactividade com o utilizador.

Depois de construído o esquema eléctrico da respectiva instalação eléctrica, o utilizador pode alterar as propriedades da cada componente conforme o desejar, nomeadamente: potências geradas e consumidas, comprimentos dos condutores, regimes de neutro, tensões estipuladas, propriedades específicas dos motores, entre outras.

Quanto aos resultados obtidos, o “My Ecodial L 3.4” dimensiona automaticamente:

- A potência a alimentar, considerando factores de utilização e de simultaneidade;
- A secção dos condutores que constituem os diversos circuitos e suas protecções (calibre dos disjuntores/fusíveis);
- A potência que uma bateria de condensadores tem de possuir, para efectuar a compensação do factor de potência a um valor predefinido pelo utilizador;
- As correntes de curto-circuito máximas e mínimas nos diversos nós da rede;
- E permite, ainda, visualizar unidades de curvas de disparo.

Relativamente às limitações, o “My Ecodial L 3.4” não permite:

- Integrar no esquema eléctrico fontes de alimentação do tipo UPS[2];
- Interligar mais do que quatro transformadores em paralelo[2];
- A integração de grupos de geradores a produzir na MT;
- Interligar a rede de MT, em paralelo, com grupos de geradores a produzir na BT (autoprodução), por exemplo co-geração;
- No dimensionamento das correntes de curto-circuito não entra em consideração com a influência dos motores alimentados;
- Quanto aos dispositivos de manobra/comando e protecção, estão naturalmente vinculados à marca “Schneider Electric”.

2.2.2 - ID-Spec Large 3.1

O “ID-Spec Large 3.1”, também desenvolvido pela empresa “Schneider Electric”, é um software de suporte ao desenho de instalações eléctricas, esquema unifilar, de MT e BT para o sector industrial e terciário. Reduz o tempo de concepção do projecto eléctrico mediante a optimização do respectivo desenho, garantindo qualidade através da comparação de possíveis soluções orientadas à eficiência energética, ao comprimento dos condutores eléctricos que constituem os diversos circuitos, para reduzir as quedas de tensão, e à optimização da distribuição das fontes de potência e cargas mediante o respectivo centro de cargas[3].

Comparativamente ao que se fez com “My Ecodial L 3.4”, para analisar o comportamento do “ID-Spec Large 3.1” e avaliar as suas potencialidades/limitações, recorreu-se ao mesmo para dimensionar a instalação eléctrica que se apresenta na Figura 2.2.

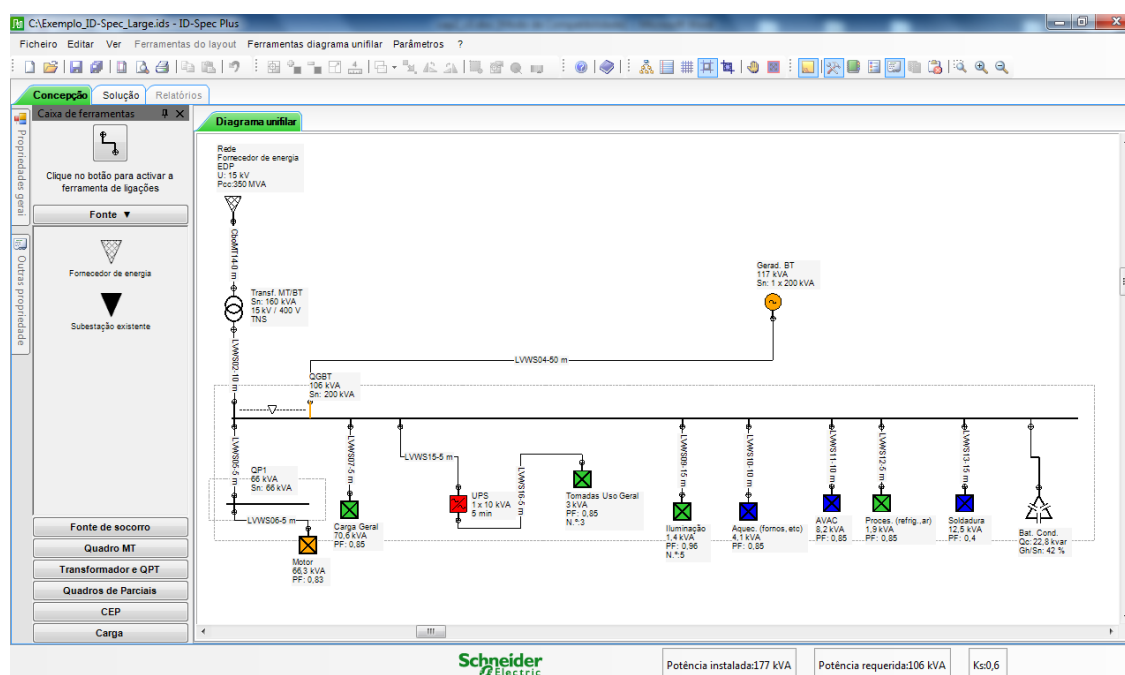


Figura 2.2 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “ID-Spec Large 3.1” - painel de interactividade com o utilizador.

Observando esta figura, pode-se constatar, tal como o “My Ecodial L 3.4”, que o “ID-Spec Large 3.1” permite elaborar esquemas unifilares de forma muito intuitiva.

Em relação a fontes de alimentação, este possui a rede (fornecedor de energia)/subestação existente, a rede/subestação existente socorrida por grupos de socorro a produzir na BT e fontes de alimentação do tipo UPS.

No que diz respeito a cargas, o “ID-Spec Large 3.1” detém cargas do tipo: aquecimento (fornos, etc.), AVAC, iluminação, motores, cargas gerais (sem designação específica), tomadas, processos (refrigeração, ar) e soldadura.

Durante a elaboração do respectivo esquema unifilar da instalação eléctrica, o utilizador pode alterar os dados de cada componente, tais como: tensões estipuladas, potências de curto-circuito, potências consumidas e geradas (opcional), regimes de neutro, comprimento dos condutores, factores de potência e de utilização das diversas cargas, nível de criticidade de cada carga mediante as quatro opções referenciadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Níveis de criticidade das cargas no programa “ID-Spec Large 3.1”[4].

	Desconectável	Cargas que podem ser desligadas à vontade para manutenção ou após uma interrupção do fornecimento normal.
	Carga que permite longas interrupções	Cargas necessárias para o funcionamento do edifício ou processo, mas que podem ser desligadas sem causar danos ou prejuízos.
	Carga que só permite breves interrupções	Cargas cuja uma interrupção superior a alguns minutos, implica perdas de lucros e/ou danos aos equipamentos e/ou perda de material produzido ou matéria-prima.
	Sem interrupção	Cargas que não devem ser interrompidas, sob qualquer circunstância e, devem ser alimentadas por uma UPS.

A definição destes tipos de criticidade para cada carga permite que o “ID-Spec Large 3.1” determine o grau de continuidade de serviço perante falhas do equipamento de manobra assim como a forma construtiva e possibilidade de desconexão dos diversos quadros ou unidades funcionais que alimentam as cargas desde os respectivos quadros. Pode-se definir o número de horas de funcionamento por dia de cada carga, factor que posteriormente permite calcular a energia consumida e perdas[4], entre outros.

Quanto aos resultados obtidos, o “ID-Spec Large 3.1” permite:

- Importar a planta da instalação eléctrica em formato “dwg”, onde posteriormente se colocam as cargas e equipamentos, para o cálculo automático do comprimento dos condutores e o dimensionamento aproximado do equipamento;
- Gerar o esquema unifilar da instalação eléctrica automaticamente;
- Visualizar o centro de cargas, possibilitando o utilizador a alterar a posição dos diversos equipamentos (postos de transformação, quadros eléctricos, cargas, entre outros) para obter uma melhor eficiência energética;
- Calcular automaticamente a potência total a alimentar pelo(s) transformador(es), grupo(s) de socorro e da(s) UPS de acordo com a potência consumida pelas cargas por estes alimentadas, considerando factores de utilização e de simultaneidade;
- Determinar as correntes estipuladas, correntes de curto-circuito trifásico simétrico máximas para os diversos equipamentos que constituem a instalação e quedas de tensão nos respectivos condutores;
- Calcular a eficiência energética do edifício, mediante dois tipos de indicadores: contribuição da correcção do factor de potência nas perdas da instalação eléctrica, peso em cobre ou alumínio dos condutores e suas potencialidades em relação a reciclagem;
- Dimensionar automaticamente a potência que a bateria de condensadores tem de possuir para compensar o factor de potência;
- Calcular as perdas da respectiva instalação eléctrica;
- Determinar a secção dos condutores que constituem os diversos circuitos e suas protecções (calibre dos disjuntores/fusíveis).

Em relação às limitações, o “ID-Spec Large 3.1” não admite:

- A integração de grupos de geradores a produzir na MT;
- Interligar a rede, em paralelo, com grupos de geradores a produzir na BT (autoprodução), por exemplo co-geração;
- Integrar grupos de geradores a produzir na BT, alimentando a instalação eléctrica individualmente (autoprodução);
- Não determina correntes de curto-circuito mínimas, assim como não determina curto-circuitos assimétricos;
- Quanto aos dispositivos do tipo quadros eléctricos, disjuntores, protecção/comando, bateria de condensadores, UPS, entre outros, estão naturalmente vinculados à marca “Schneider Electric”.

2.2.3 - DocWin 3.0

O “DocWin 3.0” foi desenvolvido pela empresa “ABB”. É um software de cálculo e desenho, que permite projectar uma instalação eléctrica de uma forma fácil, rápida e completa. É constituído por diversos algoritmos de cálculo que têm como objectivo encontrar a melhor solução para redes complexas e gerar tabelas de dados sem renunciar à elaboração do tradicional esquema unifilar[5].

Mais uma vez para analisar o comportamento “DocWin 3.0” e avaliar as suas potencialidades/limitações, recorreu-se ao mesmo para dimensionar a instalação eléctrica que se apresenta na Figura 2.3.

Examinando a Figura 2.3, verifica-se, analogamente aos softwares anteriormente descritos, que com “DocWin 3.0” é possível construir esquemas eléctricos facilmente.

Relativamente às fontes de alimentação, este permite integrar no respectivo esquema eléctrico a rede por si só, transformadores de dois e três enrolamentos, grupos de geradores a produzir na BT, alimentando a instalação eléctrica individualmente (autoprodução) e fontes de alimentação do tipo UPS.

Em relação a cargas, o “DocWin 3.0” admite a integração de cargas genéricas (sem designação específica), motores e iluminação.

Na construção do respectivo esquema unifilar da instalação eléctrica, o utilizador pode alterar os dados de cada componente, tais como: tensões estipuladas, potências de curto-circuito, potências consumidas e geradas, regimes de neutro, comprimento dos condutores, tipo de condutores (método de instalação), propriedades específicas dos motores, geradores e transformadores, entre outras.

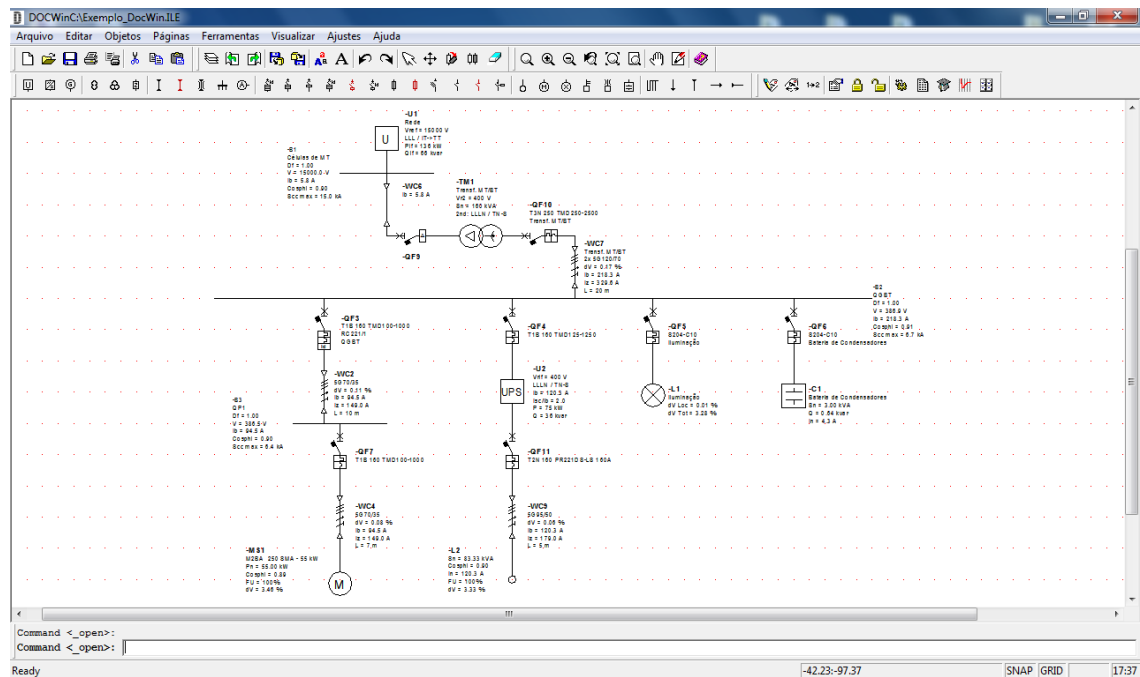


Figura 2.3 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “DocWin 3.0” - painel de interactividade com o utilizador.

Em relação a resultados conseguidos, o “DocWin 3.0” calcula automaticamente:

- Redes de baixa e média tensão, radiais ou emalhadadas;
- As correntes e quedas de tensão sob condições de trabalho;
- As correntes máximas e mínimas de curto-circuito para defeitos trifásicos, bifásicos, monofásicos e fase-terra em todos os pontos da instalação;
- Os dispositivos de manobra e protecção em baixa tensão;
- A tensão e o factor de potência em todos os pontos da rede considerando cargas trifásicas e monofásicas;
- A potência activa e reactiva requeridas em cada fonte de alimentação;
- A correcção do factor de potência;
- A elevação de temperatura em quadros de acordo com a norma IEC 60890, a potência dissipada de cada dispositivo é automaticamente obtida pela base de dados interna do programa;
- Oferece opções de limitar o dimensionamento automático a determinados aspectos e alterar quaisquer selecções automáticas feitas pelo programa;
- Proporciona a possibilidade de ajustar as curvas de tempo/corrente dos dispositivos de protecção de baixa tensão, auxiliando nos estudos de selectividade;
- Efectua o dimensionamento térmico dos condutores de acordo com diversas normas internacionais, com a máxima queda de tensão permitida no final da linha (opcional);
- Permite a visualização das curvas tempo-corrente, energia específica passante e limitação (pico) e possibilita o ajustamento de relés visualizando os efeitos no diagrama tempo real[6].

Para além do dimensionamento térmico dos condutores, sempre efectuado, e do dimensionamento para a máxima queda de tensão permitida no final da linha, o “DocWin 3.0” pode dimensionar os condutores para otimizar o rendimento económico da instalação

(dimensionamento económico), segundo a norma IEC 60287-3-2. As fórmulas, os algoritmos e os dados utilizados permitem determinar as secções económicas dos condutores para uma determinada carga estabelecida[7].

O cálculo das correntes de curto-circuito também é efectuado para a fracção da rede em média tensão; embora o “DocWin 3.0” não dimensione os cabos de média tensão, a impedância destes entra em consideração no cálculo das respectivas correntes de curto-circuito e no trânsito de potências. A contribuição das máquinas rotativas (motores e geradores) também é levada em consideração. O “DocWin 3.0” possui três métodos de cálculo de correntes de curto-circuito que o utilizador pode escolher livremente, sendo eles: o método das componentes simétricas, o método imposto pela norma IEC 60909-1 (redes industriais ou terciárias) e o método imposto pela norma IEC 61363-1 (instalações navais)[7].

O “DocWin 3.0” é dos softwares mais completos a nível de dimensionamento de instalações eléctricas do sector industrial e terciário. Apesar disso, possui algumas limitações importantes:

- Não calcula correntes de curto-circuito para o paralelo da rede com grupos de geradores, por exemplo co-geração;
- Não permite a integração de grupos de produção a produzir em MT em paralelo com a rede;
- Os dispositivos do tipo quadros eléctricos, disjuntores, protecção/comando, entre outros estão naturalmente vinculados à marca “ABB”.

2.2.4 - SIMARIS design 6.0

O “SIMARIS design 6.0” desenvolvido pela empresa “SIEMENS” é uma ferramenta de dimensionamento para sistemas de distribuição de energia em edifícios comerciais, industriais e institucionais. Esta ferramenta permite dimensionar redes eléctricas automaticamente com um mínimo de entradas manuais - para o cálculo da rede desde a fonte de média tensão até o consumidor[8].

Analogamente ao que se fez para as ferramentas informáticas anteriormente referidas, para analisar o comportamento “SIMARIS design 6.0” e avaliar as suas potencialidades/limitações, recorreu-se ao mesmo para dimensionar a instalação eléctrica que se apresenta na Figura 2.4.

Observando a Figura 2.4, pode-se constatar que o “SIMARIS design 6.0” também permite elaborar esquemas unifilares de forma muito intuitiva.

Relativamente às fontes de alimentação, este permite integrar no respectivo esquema eléctrico a rede por si só, a rede em paralelo com grupos de socorro a produzir na BT, grupos de geradores a produzir na BT, alimentando a instalação eléctrica individualmente (autoprodução).

No que diz respeito a cargas, o “SIMARIS design 6.0”, admite a integração de cargas estacionárias, circuito de tomadas, motores e cargas de reserva. Também permite a inclusão de descarregadores de sobretensões.

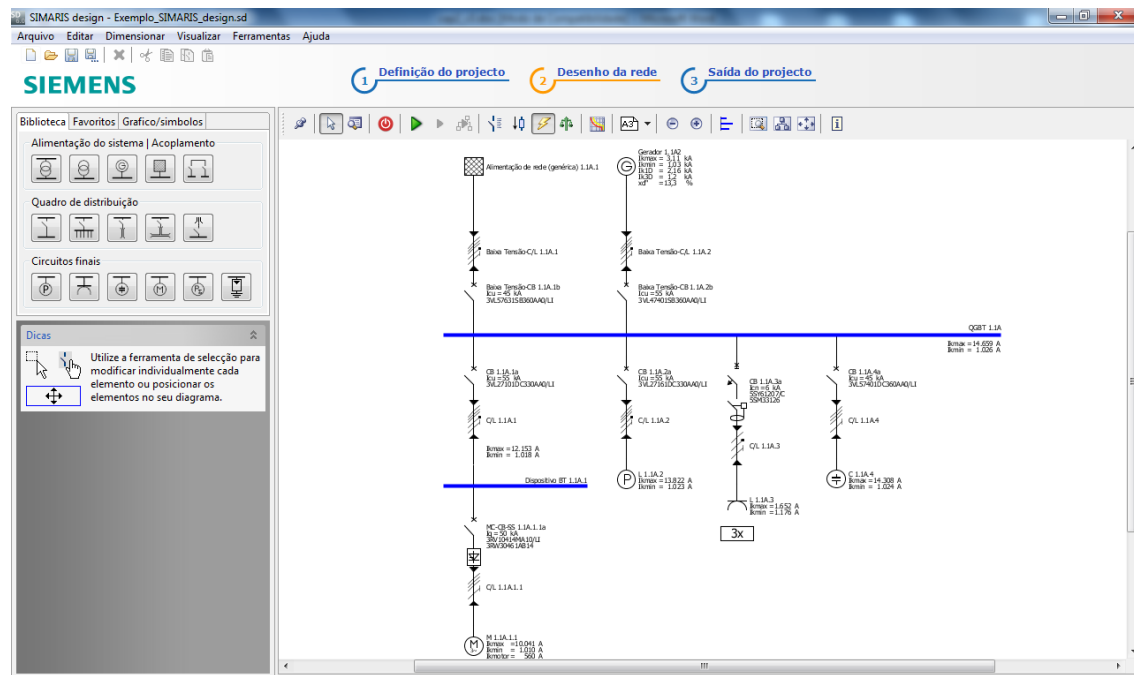


Figura 2.4 - Dimensionamento de uma instalação eléctrica, utilizado o “SIMARIS design 6.0” - painel de interactividade com o utilizador.

Quanto a resultados obtidos, o “SIMARIS design 6.0” dimensiona automaticamente:

- A potência a alimentar, considerando factores de utilização e de simultaneidade;
- A potência que uma bateria de condensadores tem de possuir para efectuar a compensação do factor de potência;
- A queda de tensão e a capacidade de condução de corrente (I_z) no sistema;
- As correntes máximas e mínimas de curto-circuito em todos os nós da rede assim como as potências activas, reactivas e aparentes;
- Exibe as especificações dos disjuntores, cabos e informações gerais;
- Exibe as curvas de selectividade considerando todos os dispositivos a montante do circuito seleccionado e o dispositivo mais próximo a jusante[8].

Relativamente as suas limitações, o “SIMARIS design 6.0”, não admite:

- A integração de grupos de produção a produzir na MT;
- A interligação da rede com grupos de geradores em paralelo, por exemplo cogeração,
- Quanto aos dispositivos do tipo quadros eléctricos, disjuntores, protecção/comando, entre outros, estão naturalmente vinculados à marca “SIEMENS”.

2.3 - Conclusões

Existem diversas ferramentas informáticas de auxílio ao projectista na elaboração de projectos eléctricos. Estas ferramentas optimizam o processo de elaboração dos respectivos projectos e garantem resultados com elevada qualidade, cumprindo as normas internacionais e regulamentos aplicáveis a cada país. Estas aplicações informáticas são hoje oferecidas pelos fabricantes de equipamentos como forma de vincular o projectista ao uso de equipamento do

próprio fabricante e o seu uso é muito vulgar embora todas possuam limitações por não permitirem certos tipos de configurações das instalações eléctricas.

Dos softwares experimentados, pôde-se constatar que o “My Ecodial L 3.4” e o “SIMARIS design 6.0” possibilitam a inclusão de uma maior variedade de configurações e tipos de fonte de alimentação no esquema unifilar da respectiva instalação eléctrica. Apesar disso, em relação à obtenção de resultados quantitativos, o “ID-Spec Large 3.1” e o “DocWin 3.0”, superam os restantes programas.

Relativamente ao cálculo de correntes de curto-circuito, contrariamente às restantes ferramentas, o “ID-Spec Large 3.1” não calcula curto-circuitos mínimos, assim como não trata curto-circuitos assimétricos.

No que diz respeito à consideração da contribuição dos motores alimentados para o valor das correntes de curto-circuito, o “My Ecodial L 3.4” não goza dessa capacidade.

Embora os instrumentos testados sejam muito completos em relação ao dimensionamento de instalações eléctricas e proporcionem imensas possibilidades relativamente à inserção de dados, escolha de equipamento e configurações da rede que constitui a instalação, entre outras, na elaboração de alguns projectos eléctricos surgem configurações em que não é possível utilizá-las para obter uma solução, o que implica que os projectistas tenham de optar por realizar os cálculos manualmente para obter os resultados pretendidos.

É de salientar que as empresas que desenvolveram as referidas ferramentas informáticas estão constantemente a efectuar actualizações que proporcionam um aumento das respectivas potencialidades.

Capítulo 3

Curto-Circuitos

3.1 - Introdução

As redes de distribuição de energia eléctrica de BT poderão ser sujeitas a condições anormais de funcionamento, que podem traduzir-se em elevações do valor da intensidade de corrente veiculada pela canalização, em relação ao valor da intensidade de corrente de serviço que foi utilizado como base para o dimensionamento da instalação. Os regimes de funcionamento em que a intensidade de corrente é mais elevada que a intensidade de corrente de serviço são denominados de sobreintensidades, sendo subdivididos em sobrecargas e curto-circuitos[9].

“As sobrecargas correspondem a situações em que a sobrelevação da intensidade de corrente em relação ao valor de serviço é pequena. Em geral, as instalações eléctricas podem suportar estes regimes durante algum tempo sem sofrerem qualquer deterioração mas, em todo o caso, eles deverão ser detectados e interrompidos se persistirem.”[9] Não foi objectivo deste trabalho abordar esse assunto.

Designa-se por curto-circuito um percurso de baixa impedância, resultante de um defeito, através do qual se fecha uma corrente, em geral muito elevada[10]. Situação que implica, face aos elevados valores iniciais previsíveis da corrente de curto-circuito, que a detecção do defeito, efectuada em regra em todas as fases, seguida da interrupção do circuito ou grupo de circuitos afectados, deva ser feita de forma tão rápida quanto possível de modo a limitar a energia total dissipada e evitar, ou minimizar, os efeitos negativos, como a deterioração das características mecânicas, de isolamento ou mesmo das canalizações, da aparelhagem associada e dos equipamentos[11].

A determinação de curto-circuitos em determinados pontos da rede tem enorme importância no planeamento, projecto e exploração das instalações, ao permitir antever e prevenir as consequências dos defeitos simulados. Esse conhecimento possibilita a tomada das medidas necessárias para minimizar tais consequências, com a mínima perturbação possível no sistema. Isto inclui, não só a colocação e regulação de dispositivos que promovam a interrupção dos circuitos defeituosos, mas também garantir que todos os componentes da rede, percorridos pelas correntes de defeito, possam suportar os seus efeitos enquanto estas persistem[12]. Viabiliza também o melhor estudo de selectividade das protecções.

O tipo e características técnicas dos aparelhos de protecção contra curto-circuitos e a secção dos condutores calculados com base no critério dos curto-circuitos são função das correntes de curto-circuito previsíveis. Os aparelhos de protecção habitualmente utilizados são os corta-circuitos-fusíveis (ou fusíveis) e disjuntores[13].

Genericamente, a condição de protecção contra curto-circuitos fica assegurada se a interrupção do circuito em defeito se efectuar num tempo total compatível com as restrições térmicas e electrodinâmicas das canalizações e equipamentos a proteger e se o poder de corte do dispositivo de protecção for, no mínimo, igual à corrente de curto-circuito mais desfavorável presumida para o local[13]. Ou seja, todos os dispositivos de protecção e componentes das instalações eléctricas devem ser dimensionados para a maior solicitação dinâmica e térmica de curto-circuito. Porém, os órgãos de protecção de curto-circuito devem reagir com segurança à menor corrente de curto-circuito susceptível de surgir nas instalações eléctricas. Para conjugar essas exigências, foram designados os termos “corrente máxima de curto-circuito” referente ao poder de corte das protecções e “corrente mínima de curto-circuito” referente à sensibilidade de actuação dos dispositivos de protecção[14].

Este capítulo tem como propósito descrever a metodologia de cálculo de curto-circuitos simétricos e assimétricos em redes MT/BT não emalhadas, segundo a norma IEC 60909-0, padrão internacional para o cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos de corrente alternada.

3.2 - Definições

Curto-circuitos trifásicos simétricos: são os curto-circuitos que afectam simultaneamente as três fases do sistema, sendo simétricos no caso de a impedância de defeito ser igual em todas as fases. Se esta impedância for nula, o curto-circuito designa-se franco[10].

De notar, desde já, que o cálculo das correntes de curto-circuito é efectuado para a hipótese de defeito franco, situação perfeitamente aceitável nas instalações eléctricas, pois a experiência mostra que o aquecimento local desenvolvido num defeito não franco provocará a passagem quase imediata a uma situação de defeito franco[13].

Curto-circuitos assimétricos: são os curto-circuitos que podem envolver uma fase e a terra, curto-circuito fase-terra (monofásico), ou duas fases, curto-circuito fase-fase (bifásico), ou ainda duas fases e a terra, curto-circuito fase-fase-terra[10].

Corrente inicial simétrica de curto-circuito - I''_k : valor eficaz da componente simétrica alternada da corrente de curto-circuito presumida, no instante da ocorrência do curto-circuito, no ponto k[12].

Potência inicial simétrica de curto-circuito - S''_k : também designada, simplesmente, por potência de defeito, é o produto da corrente inicial simétrica de curto-circuito, num curto-circuito trifásico, pela tensão composta estipulada do sistema e por um factor numérico ($\sqrt{3}$ para correntes trifásicas)[14].

No local do defeito, a corrente de curto-circuito e a tensão de serviço da rede não ocorrem simultaneamente. Assim, a potência de curto-circuito $S''_k = \sqrt{3} \times U \times I''_k$ deve ser considerada como um valor convencional e não como valor da potência, no sentido físico, dissipada no local de curto-circuito (potência de arco eléctrico)[14].

Componente contínua da corrente de curto-circuito - $i_{d.c.}$: valor médio da envolvente da corrente de curto-circuito, decrescente de um valor inicial até zero[12].

Valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico) - i_p : é o máximo valor instantâneo da corrente após o início do curto-circuito e é indicado por um valor de pico. Varia de valor conforme o momento em que ocorre o curto-circuito[14].

Corrente simétrica de curto-circuito cortada - I_b : valor eficaz de um ciclo da componente alternada simétrica no instante da separação dos contactos do aparelho de corte[12].

Corrente de curto-circuito permanente I_k : é o valor da corrente de curto-circuito simétrica que persiste depois de terem desaparecido todos os fenómenos transitórios[14].

Factor de tensão - c : razão entre a tensão equivalente da fonte de alimentação e a tensão estipulada do sistema dividida por $\sqrt{3}$ [15].

3.3 - Desenvolvimento da corrente de curto-circuito

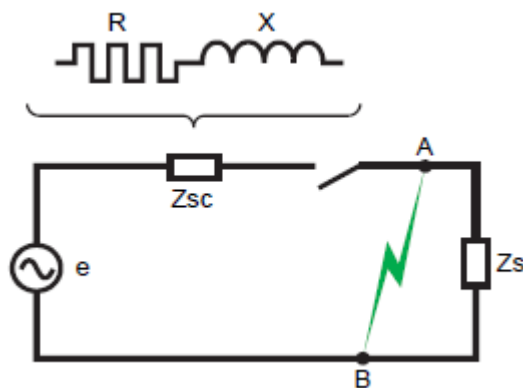


Figura 3.1 - Diagrama simplificado da rede[16].

Analisando a Figura 3.1, pode-se considerar, de uma forma simplificada, que uma rede eléctrica é constituída por uma fonte de energia AC, um interruptor, uma impedância Z_{sc} , que representa a impedância equivalente referente a todas as impedâncias a montante do interruptor, e uma impedância de carga Z_s .

Numa rede real, a impedância da fonte de alimentação é composta de todas as impedâncias a montante do curto-circuito, incluindo, se for o caso, diversas redes de diferentes níveis de tensão e a série dos cabos de ligação com diferentes secções transversais e comprimentos. Esta impedância é igual à impedância equivalente (de Thevenin) vista do ponto de curto-circuito para montante. No entanto, se houver, a jusante do ponto de curto-

circuito outros geradores ou cargas capacitivas ou indutivas (exemplo mais relevante, de motores AC) daí também surgirão contribuições para o curto-circuito.

Na Figura 3.1, quando o interruptor está na posição de fechado e, se não ocorrer nenhum curto-circuito, a corrente de serviço I_S flui através da rede. Porém, quando ocorre um defeito entre os pontos A e B, devido à baixa impedância entre esses dois pontos, surge uma elevada corrente de curto-circuito I_{SC} que só é limitada pela impedância Z_{SC} . A corrente I_{SC} que se desenvolve em condições transitórias, depende das reactâncias X e das resistências R que constituem a impedância $Z_{SC} = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Em redes de distribuição de energia, a reactância $X = \omega L$ é normalmente muito maior do que a resistência R e a razão R/X está compreendida entre 0,1 e 0,3. Essa razão é praticamente igual a $\cos \varphi$ para valores baixos: $R = Z_{SC} \times \cos \varphi \Rightarrow \cos \varphi = R/\sqrt{R^2 + X^2} \simeq R/X$ [16].

O desenvolvimento da corrente de curto-circuito depende da distância entre o local onde ocorreu o defeito e os alternadores. Essa distância não é necessariamente física, mas significa que as impedâncias dos alternadores são menores do que as impedâncias dos elementos entre os alternadores e o local onde se deu o defeito [16].

3.3.1 - Curto-circuito afastado dos alternadores

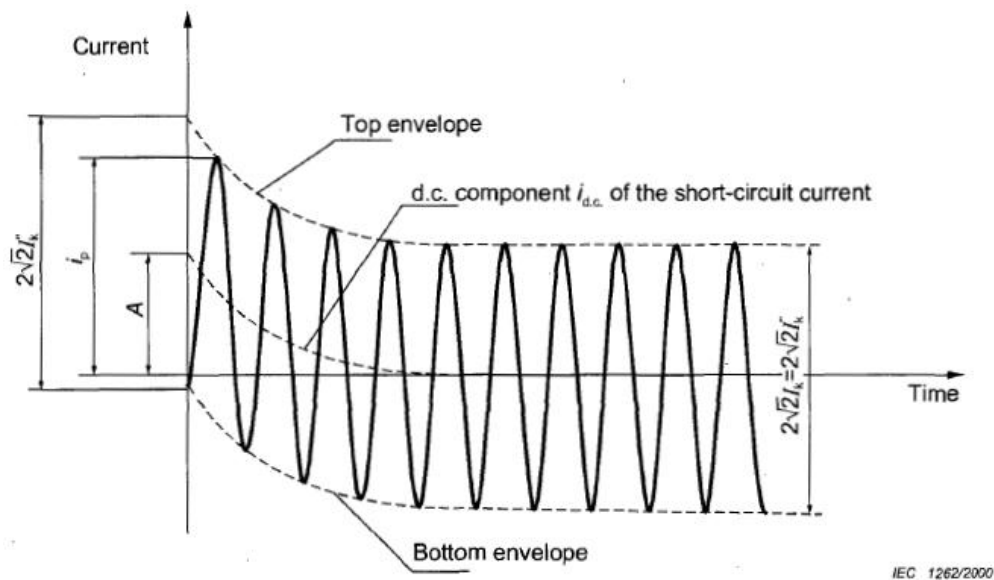


Figura 3.2 - Evolução da corrente de curto-circuito, quando o defeito ocorre longe dos alternadores[15].

“A corrente de curto-circuito inicial simétrica I''_k é praticamente constante durante o curto-circuito. Tal deve-se ao pequeno peso relativo que as máquinas síncronas têm no valor da impedância equivalente.”[17]

Esta é a situação mais frequente. As condições transitórias resultam da aplicação de uma tensão a um circuito resistivo-indutivo. Essa tensão é: $e = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha)$.

A corrente i é a soma de duas componentes: $i = i_{ac} + i_{dc}$. A primeira i_{ac} é alternada e sinusoidal, $i_{ac} = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$, onde $I = E/Z_{SC}$ e α é o desfasamento da tensão

relativamente ao instante em que ocorre o curto-circuito. A segunda i_{dc} é a componente contínua da corrente de curto-circuito, $i_{dc} = -I\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}$, em que o seu valor inicial depende de α e a sua taxa de decaimento é proporcional a R/L .

No início do curto-circuito, i é igual a zero por definição, (a corrente de serviço I_s é desprezável), daí que $i = i_{ac} + i_{dc} = 0$.

A Figura 3.3 demonstra a composição gráfica de i em função do tempo, como sendo a soma algébrica das suas duas componentes, i_{ac} e i_{dc} .

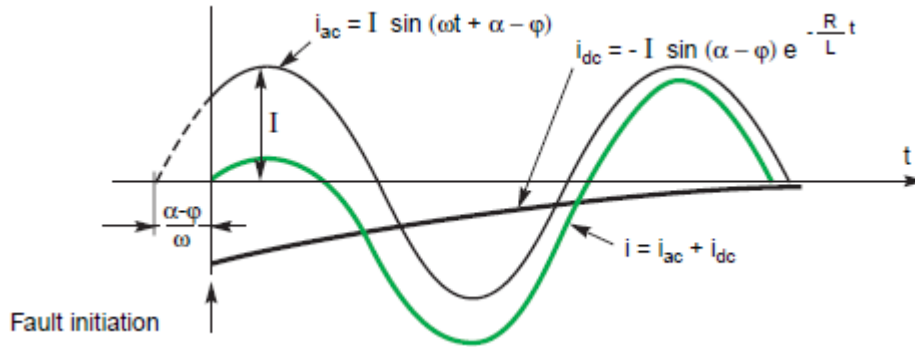


Figura 3.3 - Representação gráfica e decomposição do curto-circuito longe dos alternadores[16].

No momento em que ocorre o defeito ou no momento em que se extingue, no que diz respeito à tensão da rede, é caracterizada pelo ângulo de defasamento α . A tensão pode portanto ser expressa como: $u = E\sqrt{2} \times \sin(\omega t + \alpha)$. Implicando que o desenvolvimento da corrente seja obtido segundo a seguinte expressão:

$$i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{SC}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right], \quad (3.1)$$

com as suas duas componentes, sendo uma delas alternada, com um defasamento igual a φ em relação à tensão, e a segunda aperiódica, decaindo a zero quando t tende para infinito.

Os dois casos extremos, da evolução da corrente de curto-circuito, estão representados pela Figura 3.4 e Figura 3.5, que apresentam, para fins de simplicidade, uma única fase e tensão alternada. Quando $\alpha = \varphi \approx \pi/2$, o curto-circuito diz-se simétrico e pode ser definido por $i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{SC}} \sin \omega t$, em que desde o momento de ocorrência do defeito até atingir o período permanente, permanece praticamente constante, com o valor de pico igual a E/Z_{SC} . Para $\alpha = 0$ o curto-circuito diz-se assimétrico e pode ser definido por:

$$i = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{SC}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right], \quad (3.2)$$

o valor inicial de pico i_p depende, portanto, de φ , com $R/X \approx \cos \varphi$, razão característica do respectivo circuito.

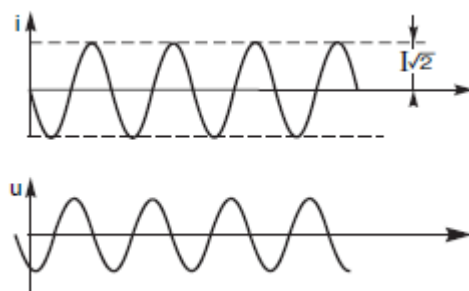


Figura 3.4 - Desenvolvimento do curto-circuito simétrico[16].

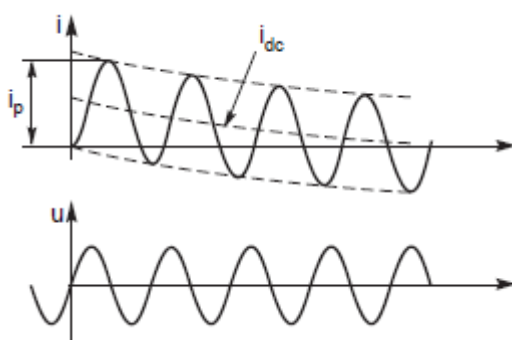


Figura 3.5 - Desenvolvimento do curto-circuito assimétrico[16].

O factor $e^{-\frac{R}{L}t}$ é inversamente proporcional ao amortecimento da componente contínua da corrente de curto-circuito, determinado pelas razões R/L ou R/X .

3.3.2 - Curto-circuito próximo dos alternadores

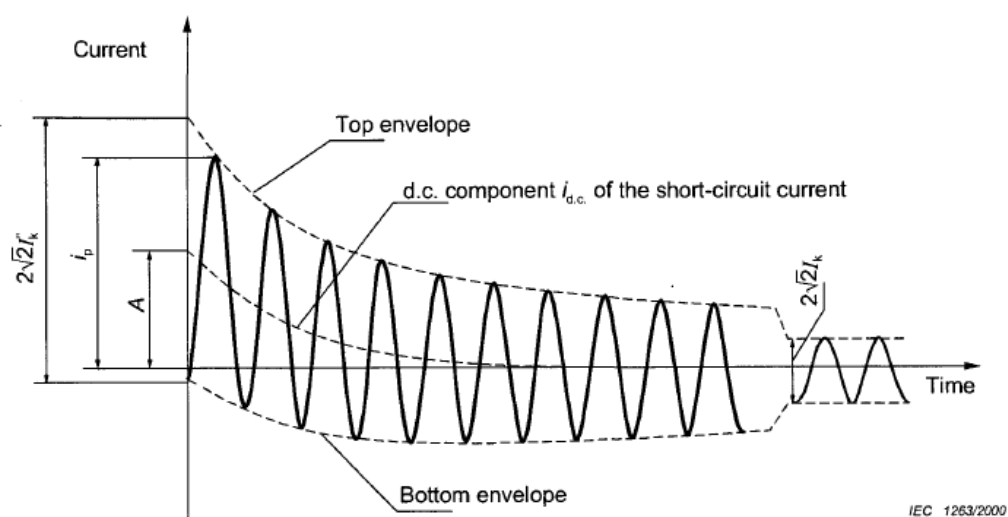


Figura 3.6 - Evolução da corrente de curto-circuito, quando o defeito ocorre perto dos alternadores[15].

“A componente alternada simétrica da corrente de curto-circuito vai diminuindo desde a corrente inicial simétrica de curto-circuito até à corrente de curto-circuito permanente. Este decrescimento deve-se à variação no tempo da reactância das máquinas síncronas e sua influência na variação da impedância vista do local de defeito.”[17]

Quando o defeito ocorre nas imediações do alternador de alimentação do circuito, a variação na impedância do gerador, neste caso a impedância dominante, amortece o curto-circuito. O fenómeno transitório que se desenvolve nestas condições é complicado devido à variação da força electromotriz resultante do curto-circuito. Por simplicidade a força electromotriz é considerada constante e a reactância interna do alternador é que varia.

A reactância do alternador adquire um valor mais alto em cada período, ou seja, a reactância subtransitória é inferior à reactância transitória, que por sua vez é inferior à reactância síncrona do alternador. O efeito sucessivo dessas três reactâncias conduz a uma redução gradual da corrente de curto-circuito, que é a soma de quatro componentes, como se pode observar pela Figura 3.7.

A presença de uma componente aperiódica na corrente de curto-circuito, resultante da evolução da corrente no circuito indutivo, faz com que esta apresente características de assimetria nos instantes que se seguem ao aparecimento do defeito.

Definem-se então três períodos relativos à variação no tempo da componente fundamental da corrente de curto-circuito:

- **Período subtransitório (0,02s a 0,05s):** período inicial durante o qual a corrente de curto-circuito diminui rapidamente de valor;
- **Período transitório (0,05s a 3s):** período seguinte, correspondendo a uma diminuição mais lenta da corrente de curto-circuito, até ser atingido o valor permanente desta;
- **Período permanente:** período em que a corrente de curto-circuito apresenta o seu valor estacionário. Obviamente, este período não será atingido, dado que o tempo total de isolamento do defeito é muito inferior[17].

A forma de onda da corrente de curto-circuito depende do valor da onda de tensão no instante em que ocorre o defeito.

A situação mais desfavorável é quando a onda de tensão passa por zero, no momento de ocorrência do curto-circuito, que corresponde ao valor máximo da componente contínua, implicando uma possível duplicação da corrente de pico em relação à corrente de curto-circuito inicial simétrica.

A situação mais favorável é quando onda de tensão passa pelo valor de pico, máximo ou mínimo, no momento de ocorrência do curto-circuito, sendo a componente contínua nula, logo a corrente de curto-circuito não apresenta componente contínua[17].

Neste caso, a corrente de curto-circuito pode ser obtida pela expressão seguinte:

$$i = E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/\tau_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \cos wt - \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{-\frac{t}{\tau_d}}, \quad (3.3)$$

onde,

E é o valor eficaz da tensão simples aos terminais do alternador;

X_d'' é a reactância subtransitória;

X_d' é a reactância transitória;

X_d é a reactância síncrona;

T_d'' é a constante de tempo subtransitória;

T_d' é a constante de tempo transitória;

T_a é a constante de tempo aperiódica.

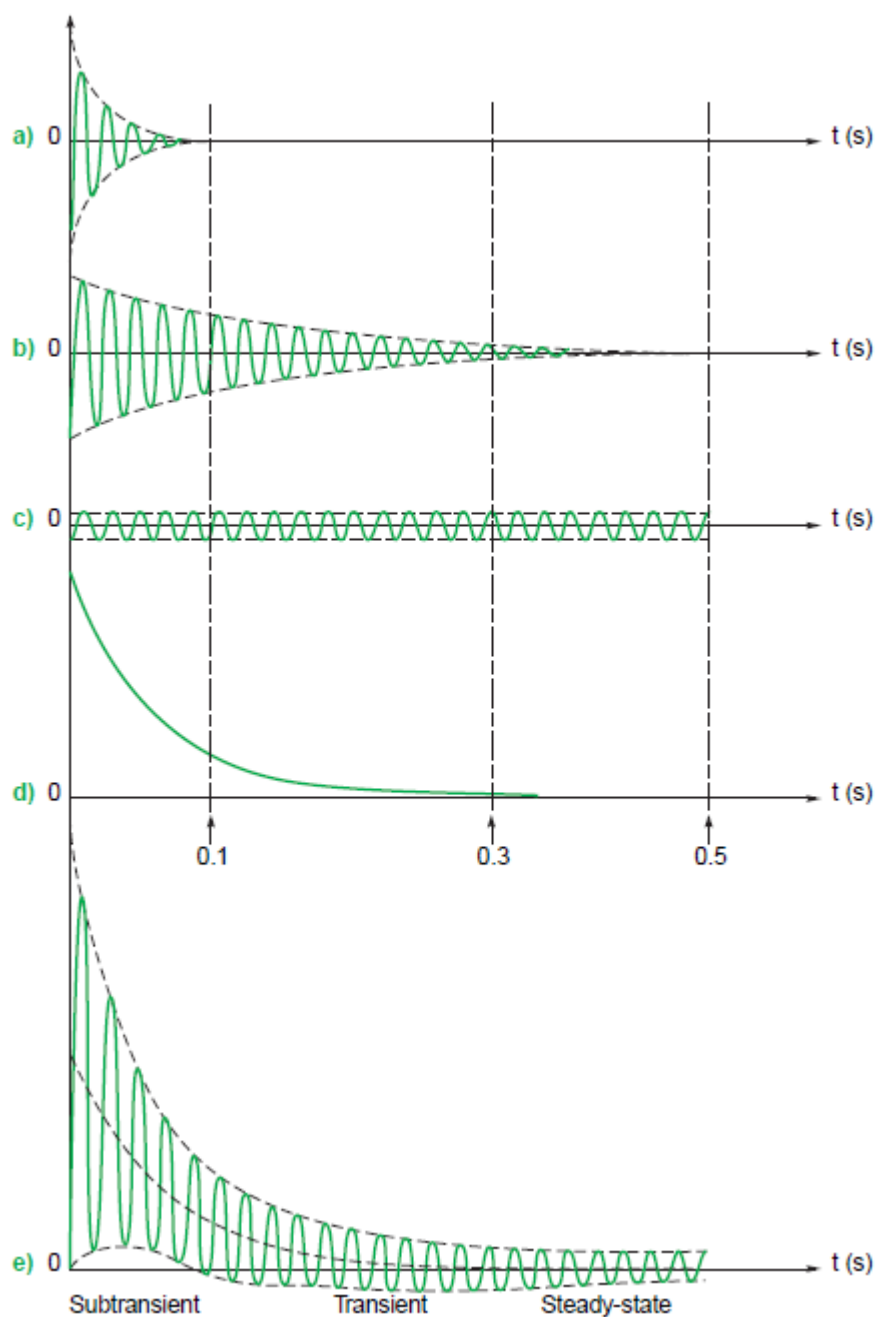


Figura 3.7 - Corrente de curto-circuito total i_{sc} (e) e contribuição das suas componentes[16].

Onde,

a) Período sub-transitório - reactância subtransitória X_d''

- b) Período transitório - reactância transitória X'_d
- c) Período permanente - reactância síncrona X_d
- d) Componente contínua da corrente de curto-circuito

O cálculo completo da corrente de curto-circuito dá-nos a corrente em função do tempo no local de ocorrência do defeito, desde o momento inicial até que se extingue, correspondendo ao valor instantâneo da tensão no início do curto-circuito.

Na maioria dos casos práticos, não é necessário determinar o desenvolvimento da corrente de curto-circuito em função do tempo. Dependendo da aplicação dos resultados, é de interesse conhecer o valor eficaz da componente alternada e o valor de pico da corrente de curto-circuito após a ocorrência do defeito. Situação abordada neste trabalho.

3.4 - Considerações

O cálculo das correntes de curto-circuito máximas e mínimas é baseado nas seguintes simplificações:

- Durante a ocorrência do curto-circuito não existe alteração do tipo de curto-circuito envolvido, ou seja, curto-circuito trifásico simétrico, continua curto-circuito trifásico simétrico, curto-circuito fase-fase, continua curto-circuito fase-fase e assim sucessivamente para os restantes tipos de curto-circuito;
- A estrutura da rede não modifica enquanto o curto-circuito não se extingue;
- A impedância dos transformadores é referida ao comutador, das tomadas de regulação de tensão, na posição principal. Esta consideração é admissível porque a impedância dos respectivos transformadores é multiplicada por um factor de correcção K_T ;
- Não são consideradas resistências de arco;
- Todas as capacidades das linhas, admitâncias *shunt* e cargas não rotativas são desprezadas, excepto as do sistema de sequência zero.

Apesar destas considerações não serem estritamente verdadeiras para os sistemas de energia a considerar, os resultados obtidos detêm uma precisão aceitável, suficiente para os fins em vista.

Para curto-circuitos simétricos e assimétricos, é útil calcular as correntes de curto-circuito, aplicando as componentes simétricas (ver subsecção 3.5.2, pág. 25).

Quando se calculam as correntes de curto-circuito em sistemas com diferentes níveis de tensão, é necessário transferir o valor das impedâncias de um nível de tensão para o outro, normalmente para o nível de tensão do local onde se está a efectuar o cálculo das respectivas correntes de curto-circuito. Para sistemas “por unidade” ou outro similar, não requerem tais transformações, desde que o sistema esteja coerente, i.e., $U_{rTHV}/U_{rTLV} = U_{nHV}/U_{nLV}$ para cada transformador que constitui o sistema, com curto-circuitos parciais. Normalmente U_{rTHV}/U_{rTLV} é diferente de U_{nHV}/U_{nLV} .

U_{rTHV} é a tensão estipulada correspondente ao lado de alta/média tensão do transformador, U_{rTLV} é a tensão estipulada correspondente ao lado de baixa tensão do transformador, U_{nHV} é a tensão nominal da rede interligada ao lado de alta/média tensão do

transformador e U_{nLV} é a tensão nominal da rede interligada ao lado de baixa tensão do transformador.

As impedâncias dos equipamentos em redes sobrepostas ou subordinadas devem ser divididas ou multiplicadas pelo quadrado da razão de transformação estipulada t_r . As tensões e correntes devem ser convertidas para a razão de transformação estipulada t_r .

3.5 - Método de cálculo

Existem dois métodos para o cálculo da corrente inicial simétrica de curto-circuito no local de ocorrência do defeito:

- O método da sobreposição, derivado do princípio de Helmholt's ou de Thevenin's;
- O método que utiliza uma fonte de tensão equivalente no local de ocorrência do defeito.

Se um determinado fluxo de carga, de uma rede, é conhecido com exactidão, então é possível determinar a corrente inicial simétrica de curto-circuito segundo o método da sobreposição. No entanto, este método determina a corrente de curto-circuito apenas em relação ao fluxo de carga pressuposto. Portanto, não conduz necessariamente à corrente de curto-circuito máxima, pois, para um determinado local de ocorrência de um defeito, existem tantas diferentes correntes de curto-circuito como condições de fluxos de carga, sem excederem as condições de fronteira das tensões e correntes durante a operação normal do sistema, mesmo que a mesma tensão de operação no local do defeito fosse conhecida[18].

3.5.1 - Fonte de tensão equivalente no local de defeito

O método de cálculo utilizado, segundo a norma IEC 60909-0, é baseado na introdução de uma fonte de tensão equivalente, no local onde se deu o curto-circuito. Essa fonte de tensão $cU_n/\sqrt{3}$ é a única tensão activa no sistema, pois todas as redes de alimentação, máquinas síncronas e assíncronas do sistema, são substituídas pela sua impedância interna.

Em todos os casos é possível determinar a corrente de curto-circuito no local onde ocorreu o defeito, recorrendo a uma fonte de tensão equivalente. Os dados operacionais, a carga dos consumidores, a posição dos comutadores dos transformadores, a excitação de geradores, entre outros, são dispensáveis; cálculos adicionais sobre todos os diferentes fluxos de carga possíveis, no momento em que surge o curto-circuito, são supérfluos.

A Figura 3.8 e a Figura 3.9 demonstram um exemplo da aplicação de uma fonte de tensão equivalente no local do defeito F . Essa fonte de tensão equivalente é a única tensão activa do sistema alimentado por um transformador, com ou sem tomadas de regulação de tensão em carga. Todas as outras tensões activas do sistema foram assumidas como nulas. Assim, a rede de alimentação da Figura 3.8 é representada pela sua impedância interna Z_{Qt} , referida ao lado de BT do transformador e o respectivo transformador pela sua impedância referida também ao seu lado de BT. Admitâncias *shunt* (por exemplo, capacidade da linhas e cargas passivas) não são consideradas quando se pretende calcular as correntes de curto-circuito, de acordo com a Figura 3.9.

Se não existirem padrões nacionais, é adequado escolher a factor de tensão c de acordo com a Tabela 3.1 (pág. 29), considerando que a tensão mais elevada num sistema normal (sem perturbações) não difere, em média, mais do que aproximadamente +5% (para sistemas de BT) ou +10% (para sistemas de alta/média tensão), da tensão nominal U_n .

Em relação a todo o processo, há vantagem em usar o “sistema p.u.” pois, como dito, o efeito de transformação introduzido por eventuais transformadores existentes é eliminado. Neste caso, é favorável tomar para unidades de base de tensão o valor estipulado para o ponto de curto-circuito. Apesar disso, neste trabalho adoptou-se sempre o sistema internacional (SI).

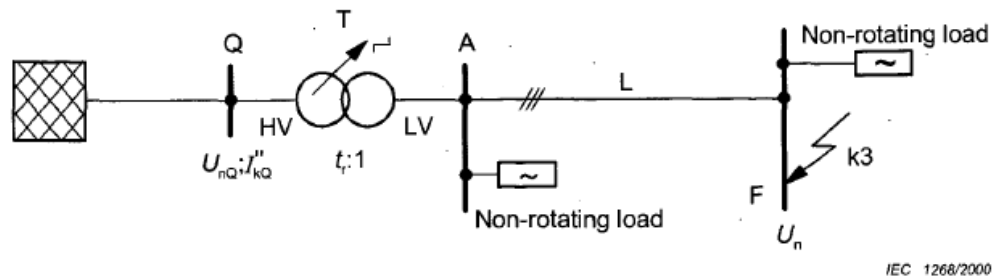


Figura 3.8 - Esquema unifilar do sistema[15].

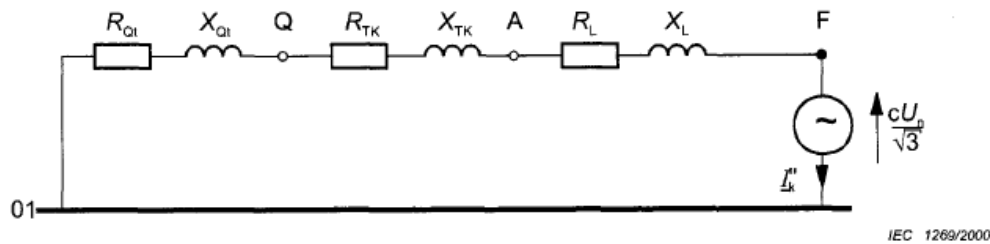


Figura 3.9 - Modelo equivalente do sistema, para o sistema de sequência positiva[15].

3.5.2 - Aplicação das componentes simétricas

Em sistemas trifásicos de corrente alternada, o cálculo do valor das correntes resultantes de curto-circuitos simétricos e assimétricos é simplificado pela utilização do método das componentes simétricas. A solução requer que o equipamento eléctrico tenha uma estrutura equilibrada, por exemplo, no caso de linhas aéreas transpostas. Porém, os resultados obtidos têm suficiente exactidão mesmo para o caso de linhas aéreas não transpostas.

Usando este método, a corrente em cada linha/condutor é encontrada pela decomposição das correntes nos seguintes sistemas designados por componentes simétricas:

- Sistema de sequência positiva - $I_{(1)}$;
- Sistema de sequência negativa - $I_{(2)}$;
- Sistema de sequência zero - $I_{(0)}$;

Considerando a linha/condutor $L1$ como referência, as correntes I_{L1} , I_{L2} e I_{L3} são obtidas por:

$$\begin{bmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ I_{L,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(1)} \\ I_{(2)} \\ I_{(0)} \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}; \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (3.5)$$

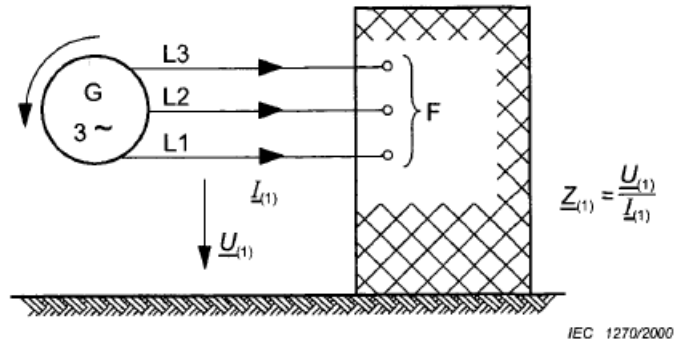


Figura 3.10 - Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência positiva $\underline{Z}_{(1)}$ [15].

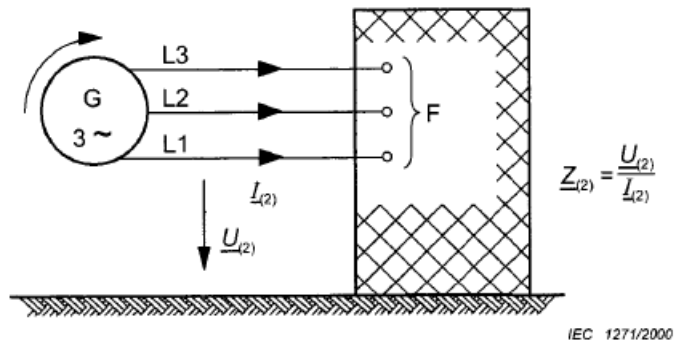


Figura 3.11 - Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência negativa $\underline{Z}_{(2)}$ [15].

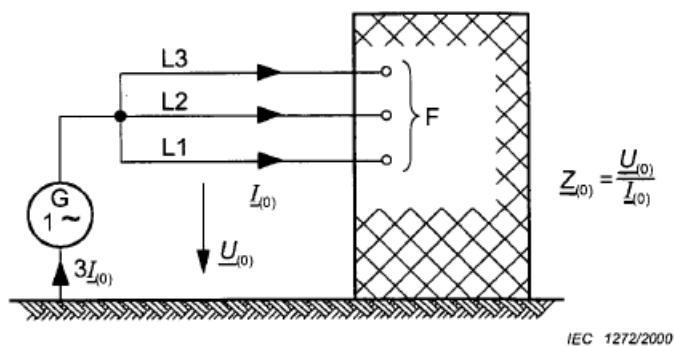


Figura 3.12 - Impedância de curto-circuito para o sistema de sequência zero $\underline{Z}_{(0)}$ [15].

Cada sistema trifásico simétrico tem a sua própria impedância.

A impedância de curto-circuito para o sistema de sequência positiva $\underline{Z}_{(1)}$, referente ao local onde ocorreu o defeito F , é obtida de acordo com a Figura 3.10, quando um sistema simétrico de tensões com ordem de sucessão de fases de sequência positiva é aplicado no

local F e todas as máquinas síncronas e assíncronas são substituídas pelas suas impedâncias internas.

A impedância de curto-circuito para o sistema de sequência negativa $\underline{Z}_{(2)}$, referente ao local onde ocorreu o defeito F , é obtida de acordo com a Figura 3.11, quando um sistema simétrico de tensões com ordem de sucessão de fases de sequência negativa é aplicado no local F .

Os valores das impedâncias de curto-circuito para o sistema de sequência positiva e negativa, diferem entre si, só no caso de máquinas rotativas. Quando se pretende calcular um curto-circuito afastado dos alternadores, geralmente é admissível considerar que $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

A impedância de curto-circuito para o sistema de sequência zero $\underline{Z}_{(0)}$, referente ao local onde ocorreu o defeito F , é obtida de acordo com a Figura 3.12, quando uma tensão alternada é aplicada entre os três condutores da linha em curto-circuito e a via de retorno (por exemplo, terra do sistema, condutor de neutro, bainhas dos cabos, entre outras).

Na prática, as linhas (linhas aéreas e cabos) em redes de BT podem ser desprezadas para os sistemas de sequência positiva, negativa e zero.

Desprezar as capacidades de sequência zero das linhas em sistemas com o neutro ligado à terra, conduz a resultados ligeiramente mais elevados que os valores reais das correntes de curto-circuito. Esse desvio depende da configuração da respectiva rede.

Excepto em casos especiais, a impedância de curto-circuito para o sistema de sequência zero referente ao local de defeito difere das impedâncias de curto-circuito para os sistemas de sequência positiva e negativa.

3.5.3 - Correntes de curto-circuito máximas

No cálculo das correntes de curto-circuito máximas, é necessário introduzir as seguintes considerações:

- O factor de tensão c_{max} de acordo com a Tabela 3.1 (pág. 29), deve ser aplicado, na ausência de um padrão nacional;
- Escolher a configuração do sistema e a máxima contribuição das centrais de produção, e redes de alimentação que levem ao máximo valor da corrente de curto-circuito no local do defeito;
- Quando a impedância equivalente Z_Q (impedância de curto-circuito da Rede) é utilizada para representar as redes externas, a impedância equivalente de curto-circuito mínimo deve ser usada, que corresponde à corrente de curto-circuito máxima, proveniente da contribuição dos alimentadores da rede;
- A contribuição dos motores assíncronos deve ser incluída;
- A resistência das linhas R_L (linhas aéreas e cabos) devem ser introduzidas à temperatura de 20°C.

3.5.4 - Correntes de curto-circuito mínimas

No cálculo das correntes de curto-circuito mínimas, é necessário introduzir as seguintes considerações:

- O factor de tensão c_{min} de acordo com a Tabela 3.1, deve ser aplicado, na ausência de um padrão nacional;
- Escolher a configuração do sistema e a mínima contribuição das centrais de produção, e redes de alimentação que levem ao mínimo valor da corrente de curto-circuito no local do defeito;
- A contribuição dos motores assíncronos não deve ser incluída;
- A resistência das linhas R_L (linhas aéreas e cabos, condutores de fase e neutro) devem ser introduzidas à temperatura de curto-circuito:

$$R_L = [1 + \delta(\theta_e - 20^\circ\text{C})] \times R_{L20}, \quad (3.6)$$

onde,

R_{L20} é a resistência à temperatura de 20°C ;

θ_e é a temperatura do condutor em graus celcius no final da duração do curto-circuito;

δ é o coeficiente de termoresistividade a 20°C , igual a $0,004/\text{K}$, valido com suficiente exactidão na maioria dos casos práticos, para o cobre, alumínio e liga de alumínio.

3.5.5 - Impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico

A magnitude da corrente de curto-circuito, máxima ou mínima, num sistema trifásico de corrente alternada, em qualquer localização, depende, primeiramente, da configuração da rede, dos geradores ou grupos de produção e dos motores alimentados e, em segundo lugar, das condições de operação da rede antes da ocorrência do curto-circuito.

As variações durante a operação de um sistema trifásico de corrente alternada são enormes. Nesse sentido, é difícil encontrar o fluxo de carga que leva a um máximo ou mínimo curto-circuito, em diferentes locais da rede. Num determinado sistema, existem tantas diferentes magnitudes de correntes de curto-circuito, como possíveis diferentes condições de fluxos de carga em cada local. Normalmente, os casos extremos de fluxo de carga não são empiricamente conhecidos.

A norma IEC 60909-0 recomenda, portanto, e descreve um método de cálculo com uma fonte de tensão equivalente $cU_n/\sqrt{3}$ no local de defeito. Este método, é um método aproximado, sem condições especiais de operação. O objectivo da norma é determinar as correntes de curto-circuito máximas e mínimas com suficiente precisão, principalmente tendo em consideração os aspectos de segurança e, na medida do possível, aspectos económicos.

Durante a fase de planeamento de uma rede, as diferentes condições de fluxos de carga são desconhecidas. Portanto, a fonte de tensão equivalente $cU_n/\sqrt{3}$ é baseada na tensão nominal do sistema U_n e no factor de tensão $c = c_{max}$ ou $c = c_{min}$ para o cálculo da máxima ou mínima corrente de curto-circuito. Esses factores c são dados pela Tabela 3.1.

A introdução do factor c é necessário devido às seguintes razões:

- A variação da tensão depende do tempo e do local de ocorrência do defeito;
- Variação das tomadas de regulação de tensão dos transformadores;
- Cargas e capacidades desprezadas para o cálculo de acordo com a norma IEC 60909-0;

- Comportamento subtransitório dos geradores, grupos de produção e motores[18].

Tabela 3.1 - Factor de tensão c (tabela de acordo com a norma IEC 60909-0).

Tensão Nominal U_n	Factor de Tensão c para o Cálculo de	
	Correntes de Curto-Circuito Máximas $c_{max}^{1)}$	Correntes de Curto-Circuito Mínimas c_{min}
Baixa Tensão (BT) 100 V a 1000 V (IEC 60038, tabela I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Média Tensão (MT) 1 kV a 35 kV (IEC 60038, tabela III)	1,10	1,00
Alta Tensão (AT) ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabela IV)		

1) $c_{max}U_n$ não deve exceder a mais alta tensão U_m para o equipamento de sistemas de energia.

2) Se a tensão nominal é definida como $c_{max}U_n = U_m$ ou $c_{min}U_n = 0,90 \times U_m$ deve ser aplicado.

3) Para sistemas de baixa tensão com uma tolerância de +6%, por exemplo, sistemas entre os 380 V e 400 V.

3) Para sistemas de baixa tensão com uma tolerância de +10%

Em redes de alimentação, transformadores, linhas aéreas, cabos, e equipamento similar, as impedâncias de curto-circuito para o sistema de sequência positiva e negativa são iguais: $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

A impedância de curto-circuito para o sistema de sequência zero $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)}/\underline{I}_{(0)}$ é determinada assumindo que uma tensão alternada é aplicada entre os três condutores em paralelo e a via de retorno (por exemplo, terra do sistema, condutor de neutro, bainhas dos cabos, entre outras). Neste caso, as três correntes de sequência zero somam-se e fluem pela via de retorno.

As impedâncias dos geradores (G), transformadores ligados à rede (T) e grupos de produção (S), são multiplicadas pelos factores de correcção K_G , K_T e K_S ou K_{SO} (calculados segundo as equações (3.16), (3.13) ou (3.14), (3.20) e (3.22)), quando se calculam as correntes de curto-circuito, com a aplicação do Teorema de Thévenin.

3.5.5.1 - Rede

Se um curto-circuito trifásico, de acordo com a Figura 3.13, é alimentado através de uma rede em que só a corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_{kQ} ou a potência inicial simétrica de curto-circuito S''_{kQ} é conhecida no ponto Q, a impedância de curto-circuito equivalente da rede Z_Q , para o sistema de sequência positiva, é determinada por:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \quad (3.7)$$

Se a razão R_Q/X_Q for conhecida, a reactância X_Q pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (3.8)$$

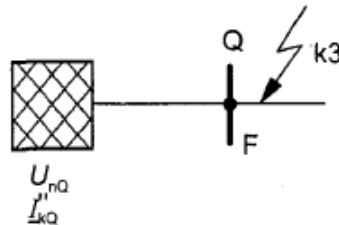


Figura 3.13 - Esquema unifilar da rede de alimentação[15].

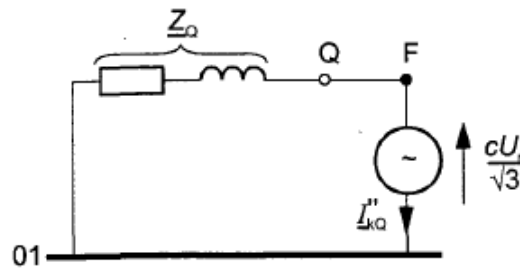


Figura 3.14 - Modelo equivalente da rede de alimentação[15].

Se um curto-circuito trifásico, de acordo com a Figura 3.15, é alimentado através de um transformador, que por sua vez está ligado a uma rede de média ou alta tensão e em que só a corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_{kQ} ou a potência inicial simétrica de curto-circuito S''_{kQ} é conhecida no ponto Q, a impedância de curto-circuito equivalente da rede Z_{Qt} , para o sistema de sequência positiva, referida ao lado de BT do transformador, é determinada por:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2}, \quad (3.9)$$

onde,

U_{nQ} é a tensão nominal do sistema no ponto Q;

I''_{kQ} é a corrente inicial simétrica de curto-circuito no ponto Q;

S''_{kQ} é potência inicial simétrica de curto-circuito no ponto Q;

c é o factor de tensão referido a tensão U_{nQ} ;

t_r é a razão de transformação estipulada quando o comutador das tomadas de regulação de tensão em carga, está na posição principal.

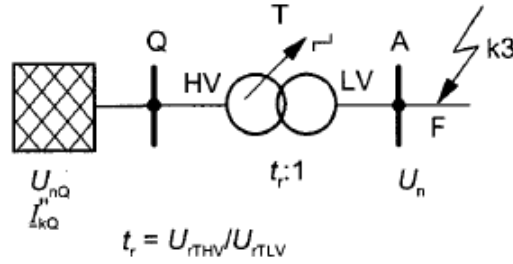


Figura 3.15 - Esquema unifilar da rede de alimentação em série com um transformador[15].

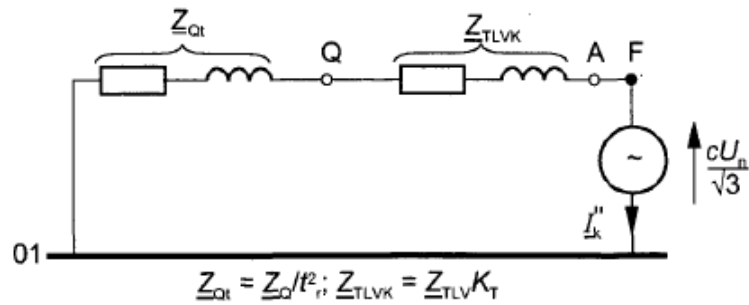


Figura 3.16 - Modelo equivalente da rede de alimentação em série com um transformador[15].

Se não for conhecido, com rigor, o valor da resistência R_Q da rede, pode ser substituído por $R_Q = 0,1 \times X_Q$ onde $X_Q = 0,995 \times Z_Q$.

O valor das correntes iniciais simétricas de curto-circuito I''_{kQmax} e I''_{kQmin} ou das potências iniciais simétricas de curto-circuito S''_{kQmax} e S''_{kQmin} devem ser fornecidos pelo distribuidor de energia, ou adequadamente calculados segundo a norma IEC 60909-0.

Em casos especiais, a impedância de curto-circuito da rede para o sistema de sequência zero deve ser considerada, dependendo da configuração dos enrolamentos e do tipo de ligação do neutro dos transformadores.

3.5.5.2 - Transformadores

A impedância de curto-circuito para o sistema de sequência positiva, de um transformador de dois enrolamentos, $Z_T = R_T + jX_T$, com ou sem tomadas de regulação de tensão em carga, pode ser calculada através das características estipuladas do respectivo transformador:

$$Z_T = \frac{u_{krT}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}, \quad (3.10)$$

$$R_T = \frac{u_{RrT}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \times I_{rT}^2} = \frac{P_{krT} \times U_{rT}^2}{S_{rT}^2}, \quad (3.11)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (3.12)$$

onde,

U_{rT} é a tensão estipulada do transformador referida ao primário ou secundário;

I_{rT} é a corrente estipulada do transformador referida ao primário ou secundário;

S_{rT} é a potência aparente do transformador;

P_{krT} são as perdas activas totais nos enrolamentos do transformador à corrente estipulada;

u_{krT} é a tensão de curto-circuito à corrente estipulada, em percentagem;

u_{RrT} é a componente resistiva estipulada da tensão de curto-circuito (queda óhmica), em percentagem.

A razão R_T/X_T geralmente decai com a dimensão do transformador. Para transformadores de grande porte a resistência é tão baixa, que a impedância pode ser assumida como sendo igual à reactância, na determinação das correntes de curto-circuito. A resistência deve ser considerada quando se pretende calcular o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito i_p , ou a componente contínua da corrente de curto-circuito $i_{d.c.}$.

Os dados necessários para o cálculo da impedância $\underline{Z}_T = R_T + jX_T = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ e da impedância $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ devem ser obtidos da chapa de características do respectivo transformador ou fornecidos pelo fabricante[19, 20].

A tensão de curto-circuito de transformadores interligados à rede pode, em casos especiais, atingir valores de até 35%; a tensão estipulada destes pode ser consideravelmente diferente da tensão estipulada da respectiva rede interligada e, em muitos casos, os transformadores são equipados com tomadas de regulação de tensão em carga. Portanto, as impedâncias de curto-circuito de transformadores com ou sem tomadas de regulação de tensão em carga e ligados à rede devem ser multiplicadas por um factor de correcção K_T obtido pela equação (3.13)[18]: $Z_{TK} = K_T \times Z_T$

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T}, \quad (3.13)$$

onde,

x_T é a reactância do transformador em p.u. $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$;

c_{max} é o factor de tensão, proveniente da Tabela 3.1 (pág. 29), referido à tensão nominal da rede interligada ao lado de BT do transformador.

Este factor de correcção K_T não deve ser aplicado às impedâncias de curto-circuito dos transformadores pertencentes a grupos de produção.

Se as condições de operação a longo prazo da rede antes da ocorrência do curto-circuito forem conhecidas com precisão, a equação (3.14) deve ser aplicada em substituição da equação (3.13).

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \times \frac{c_{max}}{1 + x_T(I_T^b/I_{rT}) \sin \varphi_T^{b'}} \quad (3.14)$$

onde,

c_{max} é o factor de tensão, proveniente da Tabela 3.1 (pág. 29), referido à tensão nominal da rede interligada ao lado de BT do transformador;

x_T é a reactância do transformador em p.u. $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$;

U^b é a tensão de operação mais elevada antes de surgir o defeito;

I_T^b é a corrente de operação mais elevada antes de surgir o defeito;

φ_T^b é o ângulo de defasamento da corrente em relação à tensão simples de uma fase, antes de surgir o defeito.

O factor de correcção K_T , também deve ser aplicado às impedâncias de curto-circuito para os sistemas de sequência negativa e zero, do transformador, quando se pretende determinar curto-circuitos assimétricos. No entanto, em relação à impedância do neutro à terra do transformador, $\underline{Z}_N$, deve ser introduzida como $3\underline{Z}_N$ no sistema de sequência zero, sem multiplicar por qualquer factor de correcção.

Na construção do esquema unifilar equivalente, para estudos de curto-circuitos, referente aos sistemas de sequência positiva, negativa e zero, é necessário analisar a configuração dos enrolamentos e o tipo de ligação do neutro à terra dos transformadores.

A Figura 3.17 e a Figura 3.18 mostram os esquemas equivalentes para os sistemas de sequência positiva e zero, dos vários tipos de configuração de enrolamentos e tipo de ligação do neutro à terra, que os transformadores de dois enrolamentos podem assumir.

No.	Transformer	Positive-sequence system	Zero-sequence system
1a			
1b			
2			
3			
1) $\underline{Z}_{(1)K} = K_T \underline{Z}_{(1)}$; K_T from equation (12a) or (12b) of IEC 60909-0. 2) $\underline{Z}_{(0)K} = K_T \underline{Z}_{(0)}$; K_T from equation (12a) or (12b) of IEC 60909-0; $\underline{Z}_N$ without correction factor. 3) K_{TAB}, K_{TAC}, K_{TBC} from equation (13) of IEC 60909-0. 4) Correction factors as indicated under 3); $\underline{Z}_N$ and X_S without correction factor. 5) Earthing switch.			

Figura 3.17 - Esquemas unifilares equivalentes de transformadores, para o sistema de sequência positiva e zero [21].

CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Figura 3.18 - Esquemas unifilares equivalentes de transformadores, para o sistema de sequência zero [22].

3.5.5.3 - Cabos/Condutores

A impedância de curto-circuito para o sistema de sequência positiva $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ pode ser calculada a partir dos dados do cabo/conductor, como as secções transversais e raios.

Por vezes, é possível estimar as impedâncias para o sistema de sequência zero, através das razões $R_{(0)L} = R_L$ e $X_{(0)L} = X_L$.

O valor das impedâncias $\underline{Z}_{(1)L}$ e $\underline{Z}_{(0)L}$ de cabos de baixa tensão e alta tensão, dependem das técnicas nacionais e normas. Valores padrão podem ser obtidos da norma IEC 60909-2, de livros ou ainda dos próprios fabricantes[14, 23-28].

Para temperaturas acima de 20°C, deve-se aplicar a equação (3.6).

3.5.5.4 - Geradores Síncronos (Alternadores)

Quando se pretende calcular correntes iniciais simétricas de curto-circuito em sistemas alimentados directamente de geradores, ausência de unidades de transformadores, por exemplo, em instalações industriais ou em instalações de BT (ver Figura 3.19), a impedância seguinte deve ser utilizada para o sistema de sequência positiva:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \times \underline{Z}_G = K_G(R_G + jX_d''), \quad (3.15)$$

com o factor de correcção:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}, \quad (3.16)$$

onde,

c_{max} é o factor de tensão de acordo com a Tabela 3.1 (pág. 29);

U_n é a tensão nominal do sistema;

U_{rG} é a tensão estipulada do gerador;

Z_{GK} é a correcta impedância subtransitória do gerador;

Z_G é a impedância subtransitória do gerador, para o sistema de sequência positiva $Z_G = R_G + jX_d''$;

φ_{rG} é o ângulo de fase entre I_{rG} e $U_{rG}/\sqrt{3}$;

x_d'' é a reactância subtransitória do gerador, em p.u., $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ onde, $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$.



Figura 3.19 - Curto-circuito alimentado directamente por um gerador[15].

O factor de correcção K_G para o cálculo da correcta impedância subtransitória Z_{GK} , deve ser introduzido porque a fonte de tensão equivalente, $cU_n/\sqrt{3}$, é utilizada no lugar da tensão E'' (ver Figura 3.20).

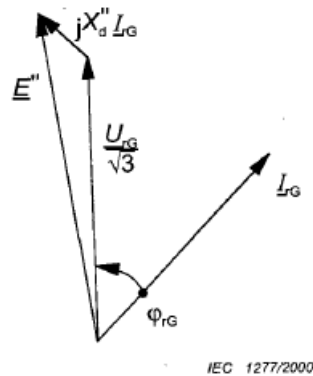


Figura 3.20 - Diagrama fasorial de um gerador síncrono em condições estipuladas[15].

Os seguintes valores para as resistências fictícias R_{Gf} , devem ser utilizados para o cálculo do valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico), com suficiente exactidão:

$R_{Gf} = 0,05 \times X_d''$ para geradores com $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ e $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$;

$R_{Gf} = 0,07 \times X_d''$ para geradores com $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ e $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$;

$R_{Gf} = 0,15 \times X_d''$ para geradores com $U_{rG} < 1 \text{ kV}$.

Para além do decaimento da componente aperiódica, os factores 0,05, 0,07, e 0,15, têm em consideração o decaimento da componente alternada da corrente de curto-circuito, durante o primeiro meio ciclo, depois do curto-circuito surgir. A influência de varias temperaturas do enrolamentos no valor de R_{Gf} não é considerada.

As impedâncias de curto-circuito dos geradores, para o sistema de sequência negativa, devem ser determinadas segundo a seguinte expressão:

$$\underline{Z}_{(2)GK} = K_G(R_{(2)G} + jX_{(2)G}) = K_G \times \underline{Z}_{(2)G} \approx K_G \times \underline{Z}_G = K_G(R_G + jX_d'') \quad (3.17)$$

Se os valores de X_d'' e X_q'' são diferentes, pode ser utilizado o valor $X_{(2)G} = (X_d'' + X_q'')/2$.

A impedância de curto-circuito dos geradores, para o sistema de sequência zero, deve ser determinada segundo a seguinte expressão:

$$\underline{Z}_{(0)GK} = K_G(R_{(0)G} + jX_{(0)G}), \quad (3.18)$$

Quando uma impedância está presente entre o neutro do gerador e a terra, não deve ser multiplicada por qualquer factor de correcção.

Os dados necessários para o cálculo da impedância $\underline{Z}_G = R_G + jX_d'' = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ e da impedância $\underline{Z}_{(0)G} = R_{(0)G} + jX_{(0)G}$ devem ser obtidos da chapa de características do respectivo gerador ou fornecidos pelo fabricante[29].

Na construção do esquema unifilar equivalente, para estudos de curto-circuitos, referente aos sistemas de sequência positiva, negativa e zero, é necessário analisar a configuração dos enrolamentos e o tipo de ligação do neutro à terra dos geradores.

A Figura 3.21 mostra os esquemas equivalentes para os sistemas de sequência positiva, negativa e zero, dos diferentes tipos de configuração de enrolamentos e tipo de ligação do neutro à terra, que os geradores podem assumir.

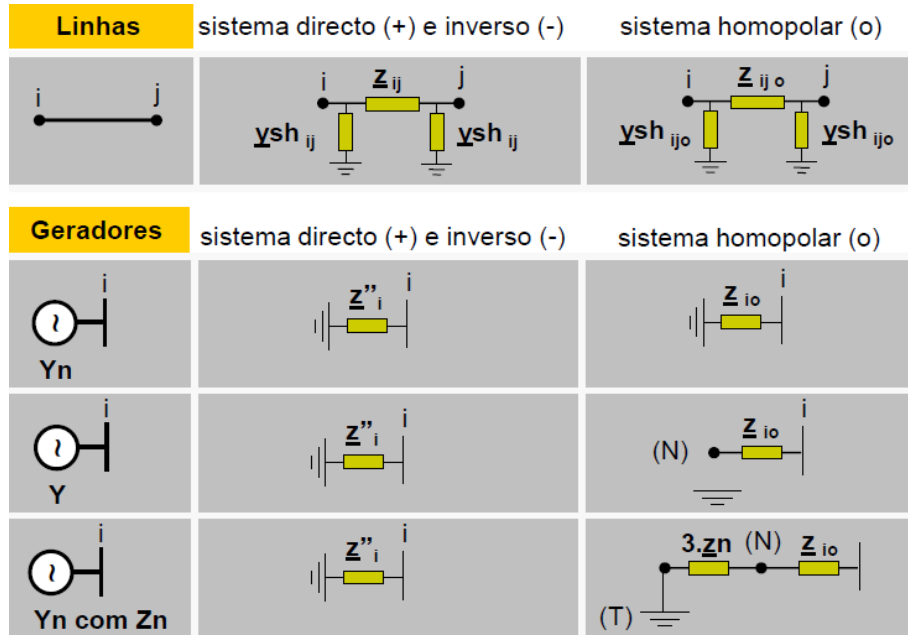


Figura 3.21 - Esquemas unifilares equivalentes de geradores, para o sistema de sequência positiva negativa e zero[22].

3.5.5.5 - Grupos de Produção com Tomadas de Regulação de Tensão em Carga

No cálculo das correntes de curto-circuito de grupos de produção com tomadas de regulação de tensão em carga, a seguinte expressão deve ser utilizada para determinar a impedância de curto-circuito, referida ao secundário do transformador (ver Figura 3.22):

$$\underline{Z}_S = K_S(t_r^2 \times \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}), \quad (3.19)$$

com o factor de correcção:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}}, \quad (3.20)$$

onde,

$\underline{Z}_S$ é a impedância correcta do grupo de produção com tomadas de regulação de tensão em carga, referida ao lado de alta/média tensão do transformador;

$\underline{Z}_G$ é a impedância subtransitória do gerador $\underline{Z}_G = K_G(R_G + jX_d'')$ (sem o factor de correcção K_G);

$\underline{Z}_{THV}$ é a impedância do transformador referida ao seu lado de alta/média tensão (sem o factor de correcção K_T);

U_{nQ} é a tensão nominal do sistema no ponto Q;

U_{rG} é a tensão estipulada do gerador;

φ_{rG} é o ângulo de fase entre I_{rG} e $U_{rG}/\sqrt{3}$;

x_d'' é a reactância subtransitória do gerador, em p.u.: $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ onde, $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$;

x_T é a reactância do transformador em p.u., com o comutador das tomadas de regulação de tensão em carga, na posição principal: $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$;

t_r é a razão de transformação do transformador: $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$.

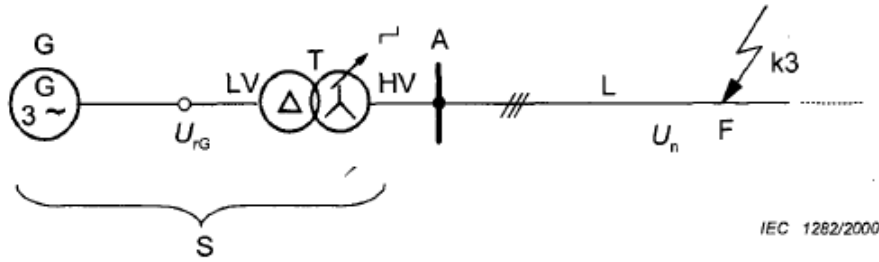


Figura 3.22 - Curto-circuito alimentado por um grupo de produção (gerador e transformador com ou sem tomadas de regulação de tensão em carga)[15].

O factor de correcção K_S deve ser aplicado às impedâncias do grupo de produção, para o sistema de sequência positiva e negativa. Também deve ser aplicado à impedância do grupo de produção, para o sistema de sequência zero, excepto, se presente, à impedância de ligação do neutro do transformador à terra.

3.5.5.6 - Grupos de Produção sem Tomadas de Regulação de Tensão em Carga

No cálculo das correntes de curto-circuito de grupos de produção sem tomadas de regulação de tensão em carga, a seguinte expressão deve ser utilizada para determinar a impedância de curto-circuito, referida ao secundário do transformador (ver Figura 3.22):

$$\underline{Z}_{SO} = K_{SO} (t_r^2 \times \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}), \quad (3.21)$$

com o factor de correcção:

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \times \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \times (1 \pm p_T) \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}, \quad (3.22)$$

onde,

$\underline{Z}_{SO}$ é a impedância correcta do grupo de produção sem tomadas de regulação de tensão em carga, referida ao lado de alta/média tensão do transformador;

$\underline{Z}_G$ é a impedância subtransitória do gerador $\underline{Z}_G = K_G(R_G + jX_d'')$ (sem o factor de correcção K_G);

$\underline{Z}_{THV}$ é a impedância do transformador referida ao seu lado de alta/média tensão (sem o factor de correcção K_T);

U_{nQ} é a tensão nominal do sistema no ponto Q;

U_{rG} é a tensão estipulada do gerador;

φ_{rG} é o ângulo de fase entre I_{rG} e $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$;

x_d'' é a reactância subtransitória do gerador, em p.u.: $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ onde, $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$;

t_r é a razão de transformação do transformador: $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$;

$1 \pm p_T$ deve ser aplicado se o transformador tem tomadas de regulação de tensão em vazio e se uma dessas tomas é utilizada permanentemente, caso contrario, deve-se escolher $1 \pm p_T = 1$. Se se pretender o obter a corrente de curto-circuito parcial, mais elevada, do grupo de produção referida ao lado do transformador de tensão mais elevada, deve-se escolher $1 - p_T$.

No caso de curto-circuito assimétricos, o factor de correcção K_{SO} deve ser aplicado às impedâncias do grupo de produção, para o sistema de sequência positiva e negativa. Também

deve se aplicado à impedância do grupo de produção, para o sistema de sequência zero, excepto, se presente, à impedância de ligação do neutro do transformador à terra.

Os factores de correcção K_S ou K_{SO} devem ser aplicados, especialmente quando a reactância subtransitória x_d'' dos geradores assume valores elevados e se a razão de transformação do transformador, com ou sem tomadas de regulação de tensão em carga é diferente da razão entre as tensões nominais de operação do sistema, referidas a ambos os lados do transformador[18].

3.5.5.7 - Motores Assíncronos

Os motores de média e baixa tensão, nos instantes iniciais do curto-circuito, passam a funcionar como geradores, pois, quando ocorre o defeito, a tensão do sistema é reduzida a um valor bastante baixo. No entanto, apesar desta ter variado bruscamente, o mesmo não acontece com o fluxo magnético no motor. Como a rotação do motor permanecerá durante algum tempo, devido a inércia da carga e do próprio rotor, este passará a gerar corrente de curto-circuito durante o tempo em que o fluxo magnético se extingue, contribuindo para o valor da corrente inicial simétrica de curto-circuito I_k'' , e para o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico) i_p , apenas durante o período subtransitário (2 a 4 ciclos)[30].

A contribuição dos motores assíncronos de BT, para o valor da corrente inicial simétrica de curto-circuito I_k'' , pode ser desprezada, se esta não for 5% mais elevada do que a corrente inicial simétrica de curto-circuito I_{kM}'' , calculada sem a contribuição dos respectivos motores.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I_{kM}'', \quad (3.23)$$

onde,

$\sum I_{rM}$ é a soma de todas as correntes estipuladas do motores ligado directamente à rede (sem transformadores), no local onde ocorreu o curto-circuito;

I_{kM}'' é a corrente inicial simétrica de curto-circuito, calculada sem a contribuição dos motores.

A impedância dos motores assíncronos $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ para o sistema de sequência positiva e negativa pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}, \quad (3.24)$$

onde,

U_{rM} é a tensão estipulada do motor;

I_{rM} é a corrente estipulada do motor;

S_{rM} é a potência aparente estipulada do motor $S_{rM} = P_{rM}/(\eta_{rM} \cos \varphi_{rM})$;

I_{LR}/I_{rM} é a razão entre a corrente de arranque e a corrente estipulada do motor.

Os dados necessários para o cálculo da impedância $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ devem ser obtidos da chapa de características do respectivo motor ou fornecidos pelo fabricante[31].

Se a razão R_M/X_M for conhecida, a reactância X_M pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (3.25)$$

As seguintes relações podem ser utilizadas com suficiente precisão:

$R_M/X_M = 0,10$, com $X_M = 0,995Z_M$ para motores de média tensão com uma potência P_{rM} por par de pólos $\geq 1 \text{ MW}$;

$R_M/X_M = 0,15$, com $X_M = 0,989Z_M$ para motores de média tensão com uma potência P_{rM} por par de pólos $< 1 \text{ MW}$;

$R_M/X_M = 0,42$, com $X_M = 0,922Z_M$ para motores de baixa tensão.

Para o cálculo das correntes de curto-circuito, os motores assíncronos são substituídos pelas suas impedâncias Z_M para o sistema de sequência positiva e negativa.

3.5.6 - Cálculo das correntes de curto-circuito

3.5.6.1 - Generalidades

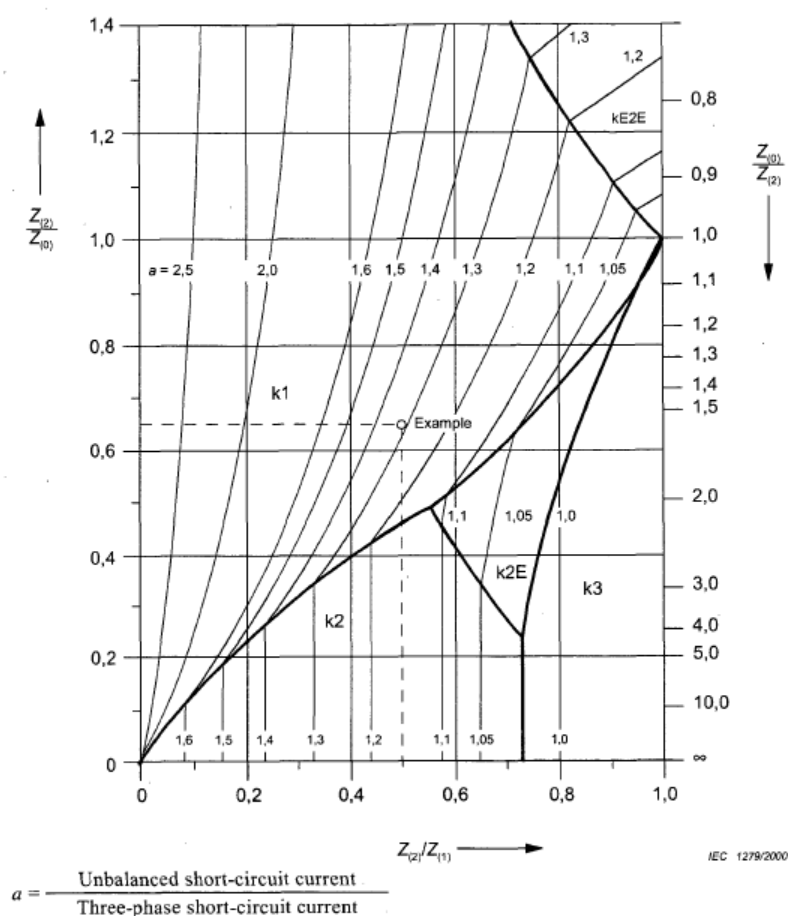


Figura 3.23 - Gráfico que permite determinar o tipo de curto-circuito que leva ao valor mais elevado da corrente de inicial simétrica de curto-circuito, no local de ocorrência do defeito, quando o ângulo das impedâncias $Z_{(1)}$, $Z_{(2)}$, $Z_{(0)}$ são idênticos[15].

O tipo de curto-circuito que leva ao valor mais elevado da corrente de curto-circuito, depende dos valores das impedâncias de curto-circuito, para o sistema de sequência positiva, negativa e zero. A Figura 3.23 ilustra isso, para o caso especial em que $\underline{Z}_{(1)}$, $\underline{Z}_{(2)}$ e $\underline{Z}_{(0)}$ têm o mesmo ângulo de impedância. A Figura 3.23 é útil, mas não deve ser utilizada em substituição dos cálculos.

Para o cálculo da corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_k , no local onde ocorreu o defeito, o sistema pode ser convertido, pela redução da rede a montante do curto-circuito numa impedância de curto-circuito equivalente $\underline{Z}_k$.

O curto-circuito pode ser alimentado por uma ou mais fontes de alimentação (ver Figura 3.24). Tratando-se de redes não emalhadas, situação abordada neste trabalho, a corrente inicial simétrica de curto-circuito total pode ser obtida pela adição das diversas correntes iniciais simétricas de curto-circuito parciais, de cada fonte de alimentação do sistema.

A corrente inicial simétrica de curto-circuito, no local de defeito F , é então um fasor igual ao somatório individual, de cada corrente inicial simétrica de curto-circuito parcial:

$$I''_k = \sum_i I''_{ki} \quad (3.26)$$

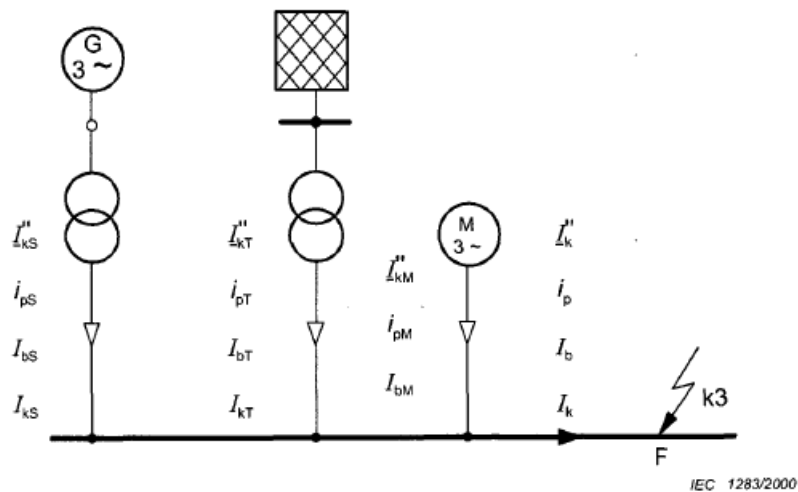


Figura 3.24 - Exemplo de uma rede não emalhada[15].

De acordo com a norma IEC 60909-0, na maioria dos casos, é suficiente determinar a corrente de curto-circuito no local de defeito F como sendo a soma individual dos valores eficazes de cada corrente de curto-circuito parcial.

Normalmente, quando $\underline{Z}_{(0)}$ é maior do que $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, a maior corrente inicial de curto-circuito ocorre para o curto-circuito trifásico simétrico. No entanto, para curto-circuitos próximos de transformadores, com baixa impedância para o sistema de sequência zero, $\underline{Z}_{(0)}$ pode ser menor do que $\underline{Z}_{(1)}$. Nesse caso, a maior corrente inicial de curto-circuito I''_{kE2E} ocorre para o curto-circuito fase-fase-terra.

3.5.6.2 - Curto-Circuito Trifásico Simétrico

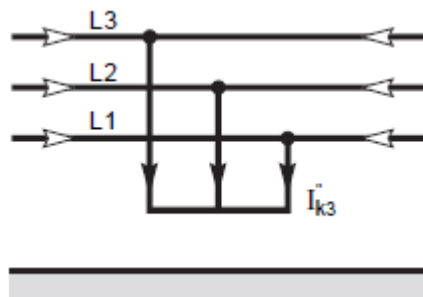
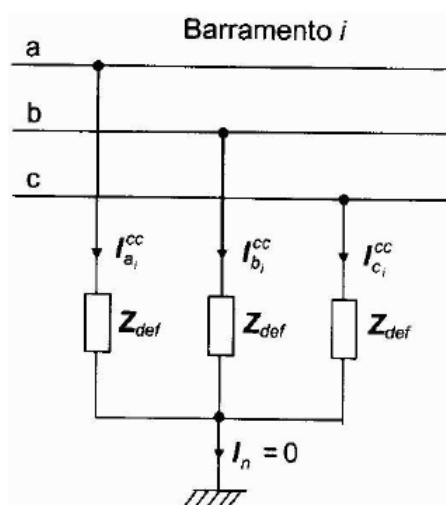


Figura 3.25 - Curto-circuito trifásico simétrico[16].

Na análise de curto-circuitos simétricos em sistemas trifásicos, pressupõe-se que os componentes e cargas do sistema, bem como o próprio defeito, são equilibrados ou simétricos. Então, nas situações pré e pós defeito, forças electromotrizes, tensões e correntes constituem sistemas trifásicos simétricos, podendo ser utilizada a análise por fase e esquemas unifilares de parâmetros constantes para os componentes do sistema.

Considerando-se um defeito trifásico simétrico no barramento i , da Figura 3.26, com uma impedância de defeito Z_{def} , do qual resultam correntes de curto-circuito iguais em módulo nas três fases e esfasadas de $\pm 120^\circ$. Ainda que o defeito envolva a terra, não existe corrente de neutro, uma vez que a soma das três correntes nas fases é nula.

Figura 3.26 - Curto-circuito trifásico simétrico no barramento i ($Z_{def} = 0$ para curto-circuito franco)[10].

Uma vez que corrente de curto-circuito é simétrica, pode-se utilizar o esquema monofásico equivalente, para uma análise por fase.

Em geral, a corrente inicial simétrica de curto-circuito I_k'' pode ser determinada pela equação (3.27), com uma fonte de tensão equivalente $cU_n/\sqrt{3}$ no local do defeito e a impedância de curto-circuito $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \times \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (3.27)$$

A fonte de tensão equivalente, $cU_n/\sqrt{3}$, deve ser introduzida no local de ocorrência do curto-circuito, com o factor de tensão c de acordo com a Tabela 3.1 (pág. 29).

Para curto-circuitos afastados dos alternadores e alimentados por uma única fonte de alimentação (ver Figura 3.15), a corrente de curto-circuito é calcula mediante a equação (3.27).

Com,

$$R_k = R_{Qt} + R_{TK} + R_L, \quad (3.28)$$

$$X_k = X_{Qt} + X_{TK} + X_L, \quad (3.29)$$

onde,

R_k é a soma das resistências em série para o sistema de sequência positiva, de acordo com a Figura 3.15;

X_k é a soma das reactâncias em série para o sistema de sequência positiva, de acordo com a Figura 3.15;

R_L é a resistência do condutor à temperatura de 20°C, quando se pretende calcular correntes de curto-circuito máximas.

Em relação aos exemplos da Figura 3.19 e Figura 3.22, a corrente inicial simétrica de curto-circuito é calculada com as correctas impedâncias do gerador e do grupo de produção em série com a impedância da linha $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$. As impedâncias de curto-circuito, para os exemplos da Figura 3.19 e Figura 3.22, podem ser obtidas pelas seguintes expressões:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Gk} + \underline{Z}_L = K_G(R_G + jX_d'') + \underline{Z}_L \quad (3.30)$$

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_S + \underline{Z}_L = K_S(t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) + \underline{Z}_L \quad (3.31)$$

Para curto-circuitos trifásicos alimentados por redes não emalhadas, com na Figura 3.24, a contribuição para o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico), de cada ramo, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$i_p = k\sqrt{2}I_k'' \quad (3.32)$$

O factor k , que traduz o decaimento da componente contínua da corrente de curto-circuito, para a razão R/X ou X/R , é obtido pela Figura 3.27, ou calculado pela expressão seguinte:

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (3.33)$$

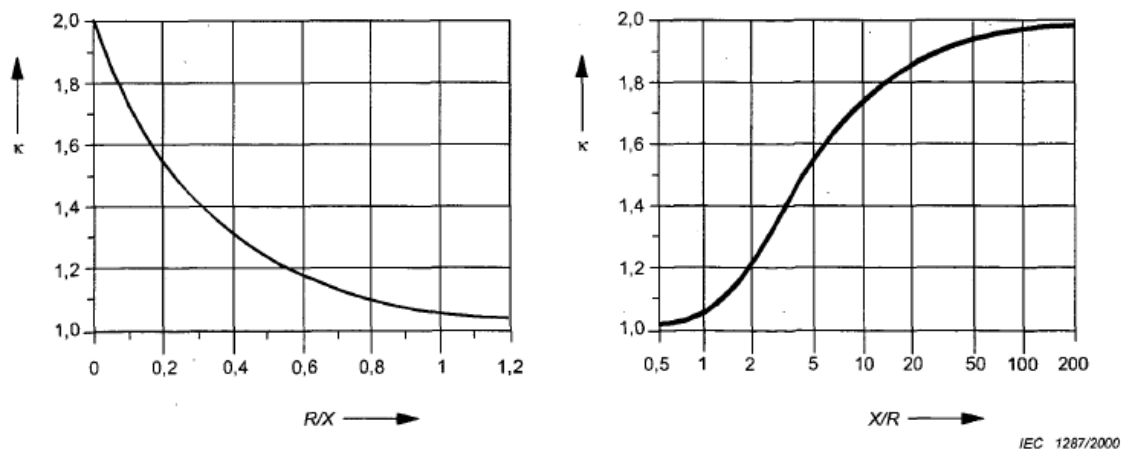


Figura 3.27 - Variação do factor k em função da razão R/X ou X/R [15].

Nas equações (3.32) e (3.33), é presumido que o curto-circuito surge quando a tensão passa pelo valor zero e, i_p é alcançado aproximadamente depois de um meio-ciclo (10 ms).

O valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico) total, no local onde surgiu o defeito F , alimentado por fontes de alimentação não emalhadas, de acordo com a Figura 3.24, é a soma das correntes de curto-circuito parciais:

$$i_p = \sum_i i_{pi} = i_{pS} + i_{pT} + i_{pM} \quad (3.34)$$

A razão R/X ou X/R , para cada ramo do respectivo sistema, é obtida pela impedância de curto-circuito equivalente $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$, no local onde ocorreu o curto-circuito F .

No caso de um curto-circuito próximo dos alternadores ou de motores, a componente alternada da corrente de curto-circuito também sofre em decaimento. Para compensar esse efeito durante os primeiros 10 ms depois de surgir o defeito, deve-se utilizar as razões fictícias R_{Gf}/X_d'' e R_M/X_M . Estas razões são consideravelmente maiores do que as razões naturais R/X , das máquinas síncronas e assíncronas[18].

3.5.6.3 - Curto-Circuito Fase-Fase (Bifásico)

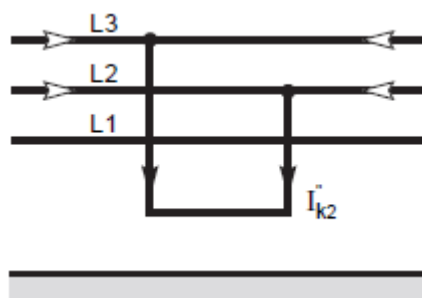


Figura 3.28 - Curto-circuito fase-fase (bifásico)[16].

Em redes de pequena dimensão, procede-se à redução da rede a montante do defeito, determinando a impedância de curto-circuito equivalente $\underline{Z}_k$, para calcular as correntes de curto-circuito assimétricas, tal como se faz para os curto-circuitos simétricos. Para efectuar essa análise, tem-se de utilizar o método das componentes simétricas, onde se decompõe a corrente em três componentes simétricas: directa, inversa e homopolar.

No caso de um curto-circuito fase-fase ou bifásico, de acordo com a Figura 3.28, a corrente inicial simétrica de curto-circuito pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_k \quad (3.35)$$

Durante o período inicial do curto-circuito, a impedância de sequência negativa é aproximadamente igual à impedância de sequência positiva, independentemente de o curto-circuito ser próximo ou afastado dos alternadores. Portanto, na equação (3.35), é possível admitir que $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

Só durante o período transitório ou permanente é que a impedância $\underline{Z}_{(2)}$ é diferente de $\underline{Z}_{(1)}$, se o curto-circuito for próximo dos alternadores (ver Figura 3.23).

Note-se que a impedância de neutro não influencia o valor da corrente de curto-circuito, uma vez que a componente homopolar é nula.

O valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito fase-fase (valor de pico), pode ser expressa pela seguinte equação:

$$i_{p2} = k\sqrt{2}I''_{k2} \quad (3.36)$$

O factor k depende da configuração do sistema. Por uma questão de simplificação, é permitido usar o mesmo valor de k que foi utilizado para o curto-circuito trifásico simétrico.

Quando $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito fase-fase i_{p2} é menor do que o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito trifásico simétrico i_p , como demonstrado na equação (3.37).

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \quad (3.37)$$

3.5.6.4 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

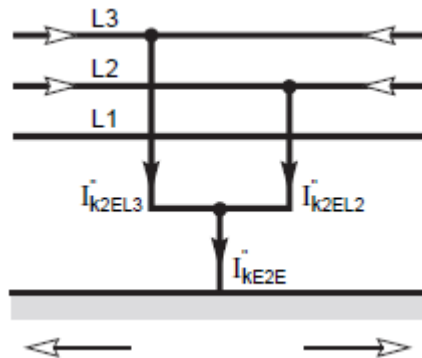


Figura 3.29 - Curto-circuito fase-fase-terra[16].

Para calcular as correntes iniciais simétricas de curto-circuito, é necessário distinguir as correntes I''_{k2EL2} , I''_{k2EL3} e I''_{kE2E} (ver Figura 3.29).

Em curtos-circuitos afastados dos alternadores, $\underline{Z}_{(2)}$ é aproximadamente igual a $\underline{Z}_{(1)}$. No caso de $\underline{Z}_{(0)}$ ser menor do que $\underline{Z}_{(2)}$, a corrente I''_{kE2E} em curtos-circuitos fase-fase-terra é geralmente superior a todas as correntes iniciais simétricas de curto-circuito I''_k , I''_{k2} , I''_{k2E} e I''_{k1} (ver Figura 3.23).

As seguintes equações permitem determinar as correntes de curto-circuito I''_{k2EL2} e I''_{k2EL3} , apresentadas na Figura 3.29:

$$I''_{k2EL2} = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}}, \quad (3.38)$$

$$I''_{k2EL3} = jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a^2\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (3.39)$$

A corrente inicial de curto-circuito I''_{kE2E} , que flui pela terra e/ou fio aterrados, de acordo com a Figura 3.29, é calculada pela seguinte expressão:

$$I''_{k2EL3} = -\frac{\sqrt{3}cU_n\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (3.40)$$

Para curtos-circuitos afastados dos alternadores, com $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, as seguintes equações conduzem aos valores absolutos:

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|}, \quad (3.41)$$

$$I''_{k2EL3} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|}, \quad (3.42)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.43)$$

Nestas equações incluem-se também a impedância de neutro multiplicada por 3, na impedância homopolar, para simplificar a notação.

O valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito (valor de pico) fase-fase-terra, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$i_{p2E} = k\sqrt{2}I''_{k2E} \quad (3.44)$$

O factor k depende da configuração do sistema. Por uma questão de simplificação, é permitido usar o mesmo valor de k , que foi utilizado para o curto-circuito trifásico simétrico.

3.5.6.5 - Curto-Circuito Fase-Terra (Monofásico)

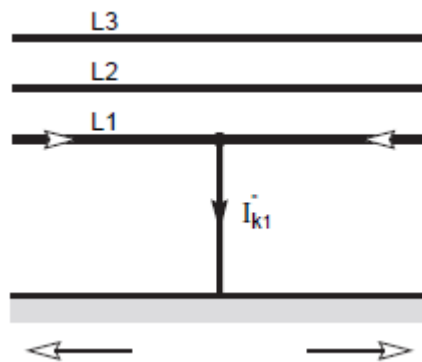


Figura 3.30 - Curto-Circuito Fase-Terra (Monofásico)[16].

A corrente inicial de curto-circuito I''_{k1} , da Figura 3.30, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (3.45)$$

Para um curto-circuito afastado dos alternadores, com $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, o seu valor absoluto é determinado pela seguinte equação:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.46)$$

Se $\underline{Z}_{(0)}$ é menor do que $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, a corrente de inicial de curto-circuito I''_{k1} é maior do que a corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_k , mas menor do que I''_{kE2E} (ver Figura 3.23). No entanto, I''_{k1} será a maior corrente a ser interrompida por um dispositivo de protecção, se $1,0 > \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} > 0,23$.

O valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito fase-terra (valor de pico), pode ser expressa pela seguinte equação:

$$i_{p1} = k\sqrt{2}I''_{k1} \quad (3.47)$$

O factor k depende da configuração do sistema. Por uma questão de simplificação, é permitido usar o mesmo valor de k , que foi utilizado para o curto-circuito trifásico simétrico.

3.6 - Síntese

A elaboração deste capítulo corresponde a um aprofundamento teórico em matéria de cálculo de correntes de curto-circuito, pois foi possível esmiuçar as respectivas fórmulas necessárias para esse efeito e compreender as considerações técnicas, segundo a norma IEC 60909-0.

A Tabela 3.2 descreve as fórmulas necessárias para o cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico e a Tabela 3.3 descreve as fórmulas necessárias para o cálculo dos diferentes tipos de curto-circuitos simétricos e assimétricos.

O processo de cálculo implementado na ferramenta apresentada no Capítulo 4, tem por base as expressões da Tabela 3.2 e da Tabela 3.3.

Tabela 3.2 - Síntese de fórmulas para o cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico.

Equipamento Eléctrico	$Z_{(1)}$	$Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$	K
Rede	$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}}$	$= Z_{(1)}$	—	—
	ou			
	$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2}$			
	$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}}$			
	$R_Q = 0,1 \times X_Q; X_Q = 0,995 \times Z_Q$			

Tabela 3.2 - Síntese de fórmulas para o cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico.

Equipamento Eléctrico	$Z_{(1)}$	$Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$	K
Transformadores	$Z_T = \frac{u_{krT}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$ $R_T = \frac{P_{krT} \times U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$	$= Z_{(1)}$	$R_{(0)} = R_{(1)}[21]$ Para Transf. YnD: $X_{(0)} = 0,95X_{(1)}[23]$ Para Transf. YZn: $X_{(0)} = 0,1X_{(1)}[23]$	$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T}$
Cabos/Condutores	$\underline{Z}_L = R_L + jX_L$	$= Z_{(1)}$	$R_{(0)L} = R_F + 3 \times R_N[14]$ $X_{(0)L} \approx 3 \times X_L[14]$	—
Geradores Síncronos (Alternadores)	$X_G = X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}[32]$ $R_{Gf} = 0,05 \times X_d''$ para geradores com $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ e $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$; $R_{Gf} = 0,07 \times X_d''$ para geradores com $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ e $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$; $R_{Gf} = 0,15 \times X_d''$ para geradores com $U_{rG} < 1 \text{ kV}$.	$= Z_{(1)}$ Substituindo a x_d'' por $x_{(2)}$ Se o valor de $X_{(2)G}$ for desconhecido: $X_{(2)G} = X_d''$ ou $X_{(2)G} = (X_d'' + X_q'')/2$	$= Z_{(1)}$ Substituindo a x_d'' por $x_{(0)}$	$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$
Grupos de Produção com Tomadas de Regulação de Tensão em Carga	$\underline{Z}_S = K_S(t_r^2 \times \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV})$	$= Z_{(1)}$	$= Z_{(1)}$	$\frac{K_S}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' - x_T \sin \varphi_{rG}}$
Grupos de Produção sem Tomadas de Regulação de Tensão em Carga	$\underline{Z}_{SO} = K_{SO}(t_r^2 \times \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV})$	$= Z_{(1)}$	$= Z_{(1)}$	$\frac{K_{SO}}{U_{rG}(1 + p_G)} \times \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}$

Tabela 3.2 - Síntese de fórmulas para o cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico.

Equipamento Eléctrico	$Z_{(1)}$	$Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$	K
Motores Assíncronos	S_{rM} $= \frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cos \varphi_{rM}}$ Z_M $= \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}}$ $= \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$ X_M $= \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}}$ $R_M/X_M = 0,10$, com $X_M =$ $0,995Z_M$ para motores de média tensão com uma potência P_{rM} por par de pólos $\geq 1 MW$; $R_M/X_M = 0,15$, com $X_M =$ $0,989Z_M$ para motores de média tensão com uma potência P_{rM} por par de pólos $< 1 MW$; $R_M/X_M = 0,42$, com $X_M =$ $0,922Z_M$ para motores de baixa tensão.	$= Z_{(1)}$	—	—

Tabela 3.3 - Síntese de fórmulas para o cálculo dos diferentes tipos de curto-circuitos simétricos e assimétricos.

Tipo de Curto-Circuito	I''_k (Situação Geral)	i_p
Curto-Circuito Trifásico Simétrico	$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{(1)} }$	$i_p = k\sqrt{2}I''_k$ $k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}$
Curto-Circuito Fase-Fase	$I''_{k2} = \frac{cU_n}{ Z_{(1)} + Z_{(2)} }$	$i_{p2} = k\sqrt{2}I''_{k2}$
Curto-Circuito Fase-Fase-Terra	$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n Z_{(2)} }{ Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(1)}Z_{(0)} + Z_{(2)}Z_{(0)} }$	$i_{pE2E} = k\sqrt{2}I''_{kE2E}$
Curto-Circuito Fase-Terra	$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{ Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)} }$	$i_{p1} = k\sqrt{2}I''_{k1}$

Capítulo 4

Ferramenta de Cálculo

Neste capítulo será apresentada a forma como foi desenvolvido o software de cálculo que servirá de auxílio ao projectista na concepção de determinados tipos de projectos eléctricos.

Serão ilustrados os diversos painéis de interacção com o utilizador, para uma melhor compreensão no manuseamento da ferramenta, como por exemplo, na inserção de dados e obtenção de resultados.

4.1 - Software Desenvolvido

A ferramenta de cálculo referida, adiante designada pelo acrónimo “calcicc”, foi implementada na linguagem de programação designada “Lazarus”. Optou-se por esta linguagem, visto ser de aquisição gratuita, por ter como referência na sua constituição a linguagem de programação denominada “Delphi”, que é orientada a objectos e com elevadas potencialidades, e ainda por o autor deter alguns conhecimentos prévios, adquiridos durante a sua formação académica, realizada na FEUP.

O software foi implementado com o objectivo de criar uma interface simples e apelativa ao utilizador, realizando os cálculos de forma automática e com rigor. O processo de cálculo implementado na ferramenta é baseado na fundamentação teórica presente no Capítulo 3.

4.1.1 - Introdução

O *calcicc* é uma ferramenta de cálculo de correntes de curto-circuitos, para sistemas de distribuição de energia em edifícios do sector terciário e industrial.

Como esta ferramenta foi desenvolvida para determinar resultados rapidamente, com o mínimo de entradas manuais. Esta optimiza o processo de concepção do projecto eléctrico, oferecendo vantagens a todos os envolvidos, nomeadamente no aumento da confiabilidade dos cálculos realizados, que estão directamente relacionados com a exploração segura da instalação e, consequentemente, com a protecção de pessoas.

4.1.2 - Inicialização do *calcicc*

Ao iniciar o *calcicc*, será apresentado ao utilizador o seguinte formulário:

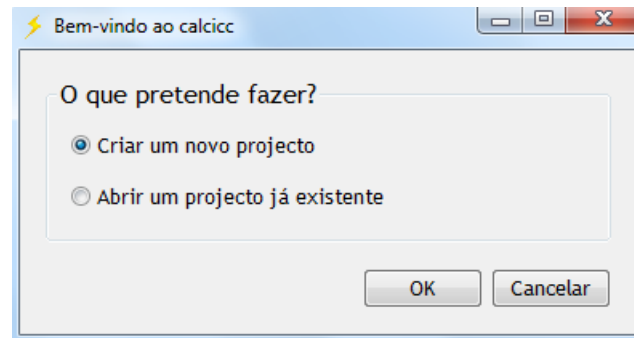
A screenshot of a Windows-style dialog box titled "Bem-vindo ao calcicc". Inside the dialog, there is a question "O que pretende fazer?" followed by two radio button options: "Criar um novo projecto" (which is selected) and "Abrir um projecto já existente". At the bottom right of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancelar".

Figura 4.1 - Formulário inicial do *calcicc*.

4.1.2.1 - Criar um novo projecto

Se o utilizador seleccionar esta opção e clicar no botão "OK", surgirá o formulário da Figura 4.2, onde este pode descrever os dados, para definição do respectivo projecto eléctrico.

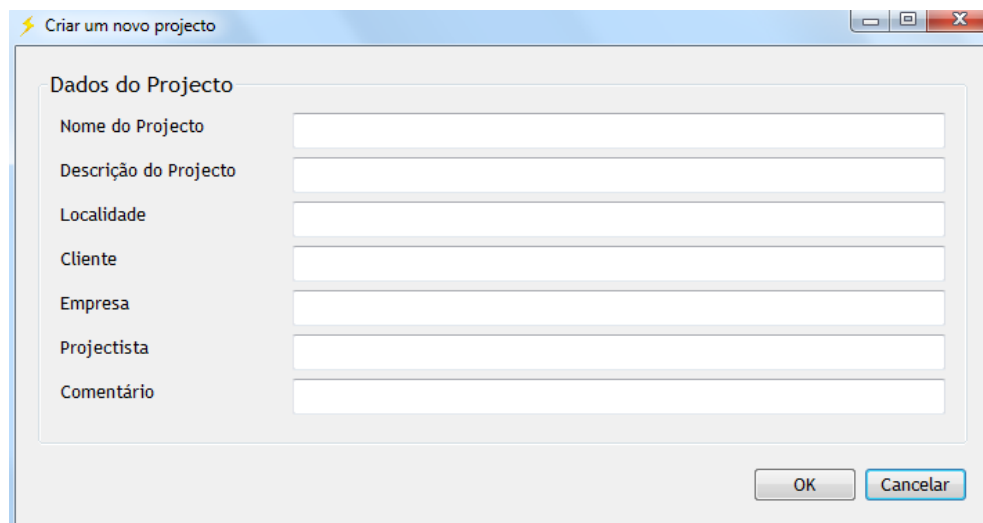
A screenshot of a Windows-style dialog box titled "Criar um novo projecto". The dialog contains a section titled "Dados do Projecto" with seven input fields: "Nome do Projecto", "Descrição do Projecto", "Localidade", "Cliente", "Empresa", "Projectista", and "Comentário". At the bottom right of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancelar".

Figura 4.2 - Formulário para definir os dados do projecto.

4.1.2.2 - Abrir um projecto já existente

Esta opção, como o próprio nome indica, permite abrir um projecto anteriormente elaborado. Clicando no botão "OK", será apresentada uma janela standard do Windows, onde o utilizador pode indicar o endereço do respectivo projecto.

Se o utilizador clicar no botão "Cancelar", do formulário inicial do *calcicc* (ver Figura 4.1), este criará um novo projecto em branco com as definições padrão do programa, como se pode observar na Figura 4.3.

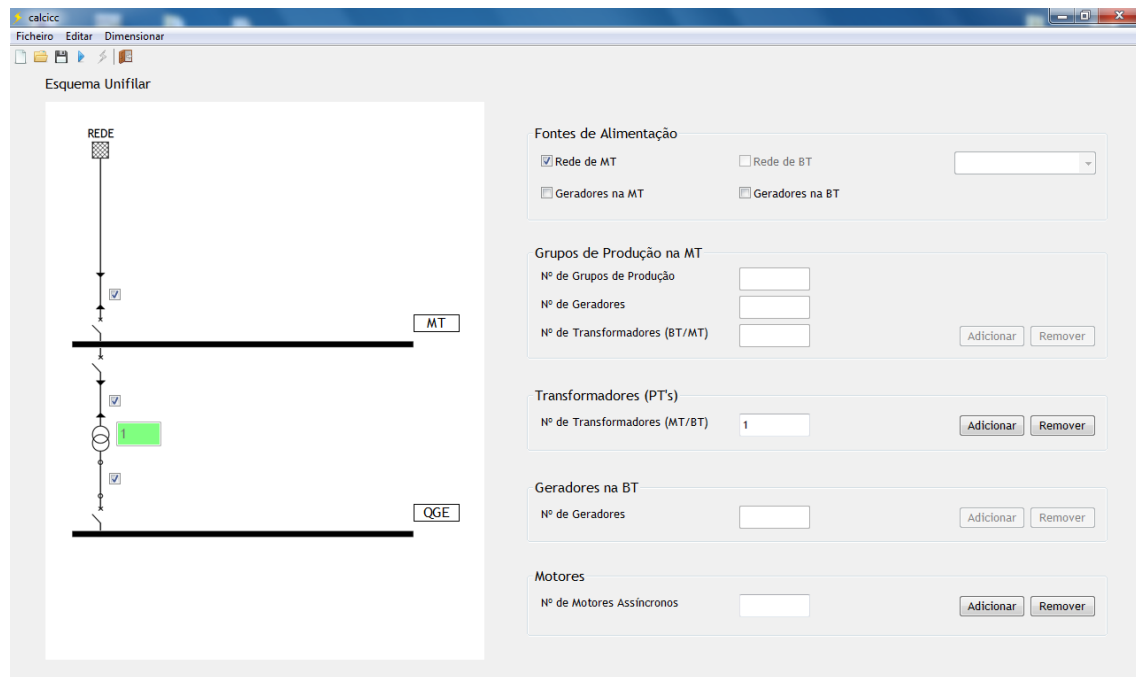


Figura 4.3 - Formulário principal do *calcicc*.

4.1.3 - Apresentação

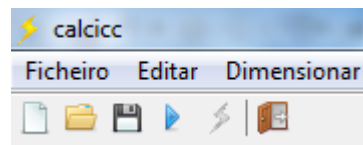


Figura 4.4 - Parte superior do formulário principal do *calcicc*.

4.1.3.1 - Barra de Menu

Ao clicar em cada um dos menus que constituem a barra de menu, surgirão diversos submenus que permitirão efectuar o que está descrito na Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Tabela 4.1 - Itens do menu Ficheiro.

Menu Ficheiro	
Submenu	Descrição
Novo	Permite criar um novo projecto.
Abrir...	Permite abrir um projecto anteriormente elaborado.
Guardar como...	Permite guardar um novo projecto.
Sair...	Permite fechar o <i>calcicc</i> .

Tabela 4.2 - Itens do menu Editar.

Menu Editar	
Submenu	Descrição
Dados do Projecto	Permite editar os dados de definição do projecto.

Tabela 4.3 - Itens do menu Dimensionar.

Menu Dimensionar	
Submenu	Descrição
Calcular Curto-Circuitos	Determina os curto-circuitos simétricos/assimétricos no QGE.

4.1.3.2 - Barra de Ferramentas

Pela observação da Figura 4.4, pode-se constatar que o *calcicc* também possui uma barra de ferramentas com diversos ícones, que permitem efectuar o que está descrito na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Ícones da barra de ferramentas.

Barra de Ferramentas	
Ícone	Descrição
	Permite criar um novo projecto.
	Permite abrir um projecto anteriormente elaborado.
	Permite guardar um novo projecto.
	Determina os curto-circuitos simétricos/assimétricos no QGE.
	Permite visualizar o formulário de apresentação de resultados.
	Permite fechar o <i>calcicc</i> .

4.1.4 - Esquema Unifilar

Esta é a área de trabalho destinada ao desenho da rede propriamente dita. Como se pode visualizar na Figura 4.3, esta é composta essencialmente pela folha de desenho e pelos diversos grupos, que permitem inserir os equipamentos eléctricos, na respectiva folha de desenho.

4.1.4.1 - Adicionar Equipamentos

Para adicionar os equipamentos eléctricos na folha de desenho, o utilizador tem de começar por definir os tipos de fontes de alimentação do sistema, através do grupo de opções ilustrado na Figura 4.5. A Tabela 4.5 descreve os tipos de fontes de alimentação possíveis de incluir no sistema.

Fontes de Alimentação

☒ Rede de MT

☐ Rede de BT

☐ Geradores na MT

☐ Geradores na BT

Figura 4.5 - Grupo: Fontes de Alimentação.

Tabela 4.5 - Opções do grupo: Fontes de Alimentação.

Grupo: Fontes de Alimentação	
Opção	Descrição
Rede de MT	Inserir na folha de desenho, a rede de média tensão (fornecedor de energia), ou seja, um PT com média tensão, proveniente de uma subestação e, respectivos cabos de ligação até ao QGE [Figura 4.6].
Rede de BT	Inserir na folha de desenho, a rede de baixa tensão (fornecedor de energia), ou seja, uma alimentação proveniente do secundário de um PT de distribuição e, receptivo cabo de ligação ao QGE [Figura 4.7].
Geradores na MT	Inserir na folha de desenho, grupos de produção a produzir na MT, constituídos por geradores de BT em série com transformadores elevadores (BT/MT) e, respectivos cabos de ligação até ao QGE [Figura 4.8].
Geradores na BT	Inserir na folha de desenho, geradores a produzir na BT e, respectivos cabos de ligação ao QGE [Figura 4.10].

Depois de o utilizador seleccionar os tipos de fontes de alimentação que constituem o sistema e, se de entre essas fontes de alimentação, estiver presente um grupo de produção ou um gerador de BT, este pode através da caixa de selecção, situada no canto superior direito da Figura 4.5, determinar se o grupo de produção ou o gerador de BT irá funcionar em paralelo com a rede (Rede c/ Autoprodução) ou se funcionará, simplesmente, como grupo de socorro (Rede c/ Socorrido).

As figuras seguintes ilustram as diversas combinações de fontes de alimentação, possíveis de efectuar com o *calcicc* que se aplicam a sistemas de distribuição de energia reais, conforme especificação da Empresa (FASE - Estudos e Projectos S.A.):

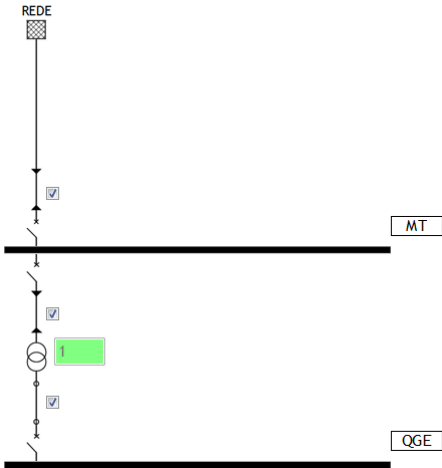


Figura 4.6 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT.

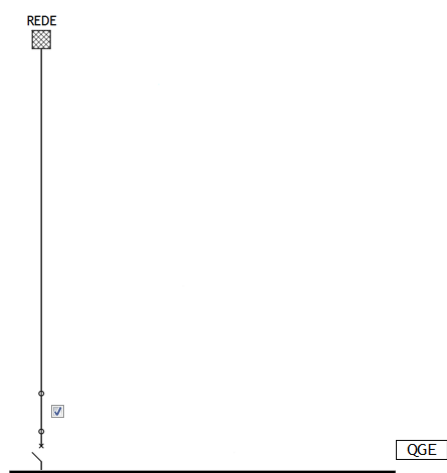


Figura 4.7 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de BT.

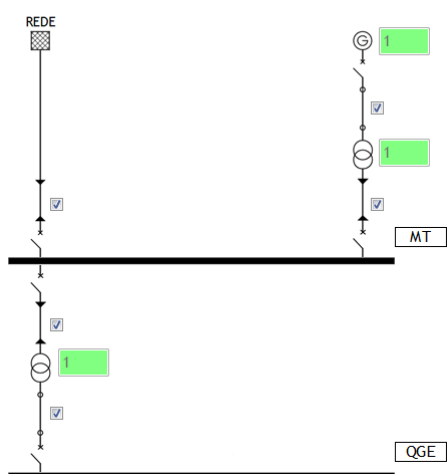


Figura 4.8 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT em paralelo com um Grupo de Produção a produzir na MT.

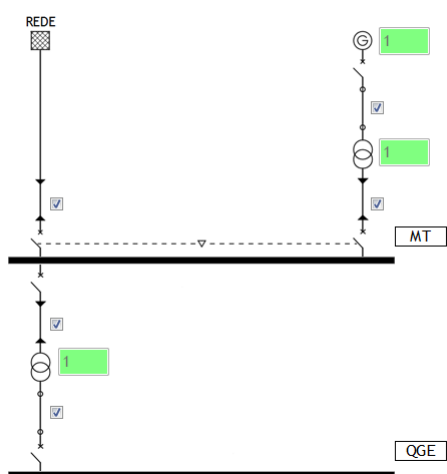


Figura 4.9 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT socorrida por um Grupo de Socorro a produzir na MT.

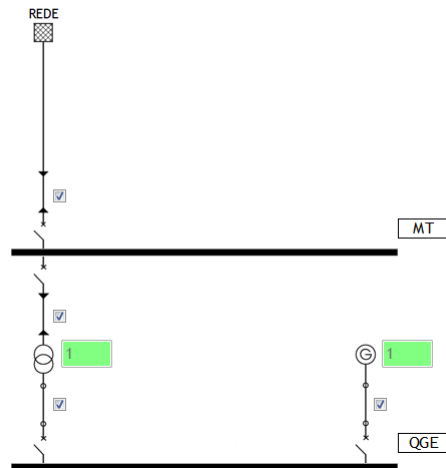


Figura 4.10 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT em paralelo com um Gerador a produzir na BT.

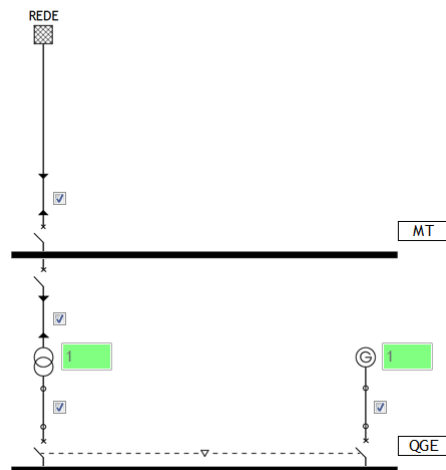


Figura 4.11 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de MT socorrida por um Grupo de Socorro a produzir na BT.

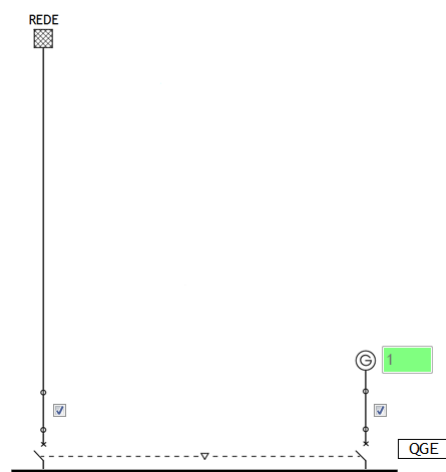


Figura 4.12 - Sistema de energia alimentado por uma Rede de BT socorrida por um Grupo de Socorro a produzir na BT.

Definida a combinação de fontes de alimentação do sistema, o utilizador pode preferir o número de equipamentos a instalar, através dos seguintes grupos de opções:

Figura 4.13 - Grupo: Grupos de Produção na MT.

Tabela 4.6 - Opções do grupo: Grupos de Produção na MT.

Grupo: Grupos de Produção na MT	
Opção	Descrição
Nº de Grupos de Produção	Permite predefinir o número da grupos de produção a instalar no sistema.
Nº de Geradores	Permite predefinir o número total de geradores, presentes em todos os grupos de produção.
Nº de Transformadores	Permite predefinir o número total de transformadores elevadores (BT/MT), presentes em todos os grupos de produção.

Figura 4.14 - Grupo: Transformadores (PT's).

Tabela 4.7 - Opções do grupo: Transformadores (PT's).

Grupo: Transformadores (PT's)	
Opção	Descrição
Nº de Transformadores (MT/BT)	Permite predefinir o número total de Transformadores (MT/BT) a instalar no sistema.

Figura 4.15 - Grupo: Geradores na BT.

Tabela 4.8 - Opções do grupo: Geradores na BT.

Grupo: Geradores na BT	
Opção	Descrição
Nº de Geradores	Permite predefinir o número total de geradores a produzir na BT.

Figura 4.16 - Grupo: Motores.

Tabela 4.9 - Opções do grupo: Motores.

Grupo: Motores	
Opção	Descrição
Nº de Motores Assíncronos	Permite predefinir o número total de motores assíncronos, a serem alimentados pelo QGE.

Em cada um dos grupos apresentados anteriormente, depois do utilizador definir, através das caixas de texto, o número de equipamentos a incluir no sistema, deve clicar no botão “Adicionar”, para que estes sejam efectivamente desenhados na folha de desenho (ver Figura 4.17).

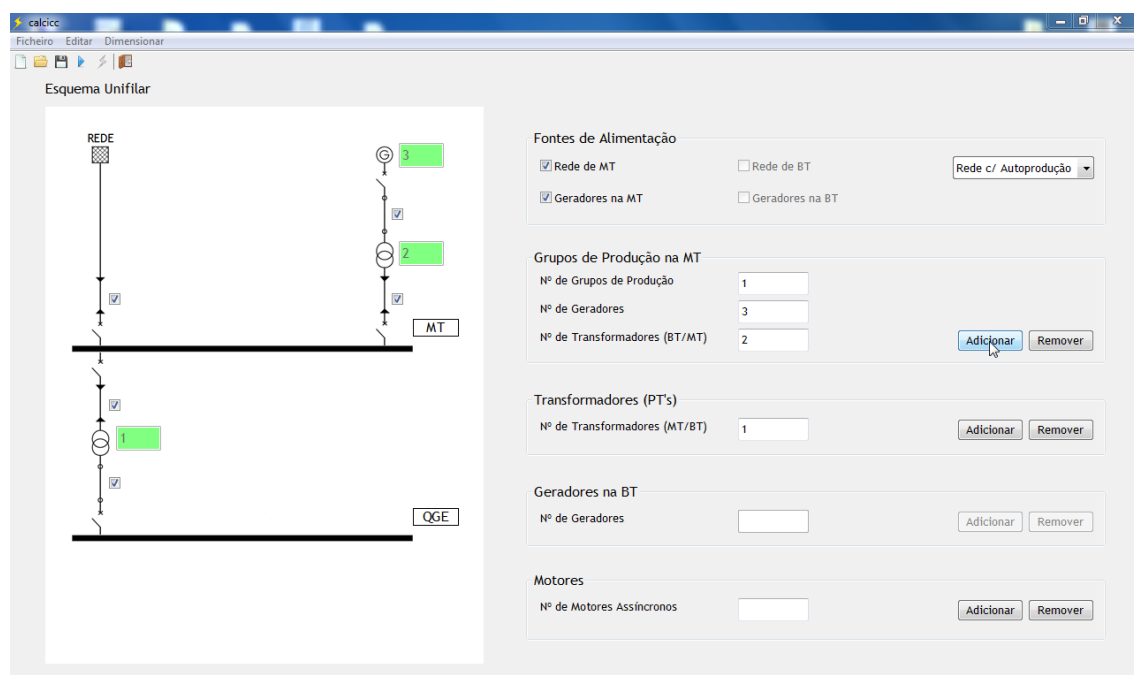


Figura 4.17 - Exemplo de como adicionar grupos de produção na folha de desenho do *calcicc*.

4.1.4.2 - Incrementar/Decrementar Equipamentos

Para incrementar ou decrementar um equipamento eléctrico, o utilizador deve alterar o número do respectivo equipamento, na caixa de texto do grupo de opções correspondente e, de seguida, clicar novamente no botão “Adicionar”.

4.1.4.3 - Remover Equipamentos

Para remover um equipamento, o utilizador deve clicar no botão “Remover” do grupo de opções correspondente e, de seguida, confirmar a operação.

4.1.4.4 - Características dos Equipamentos

Depois de construído o esquema unifilar da instalação eléctrica, o utilizador pode definir as características de todos os equipamentos que constituem o sistema. Para isso, deverá clicar sobre o respectivo equipamento, na folha de desenho, tal como indica a Figura 4.18.

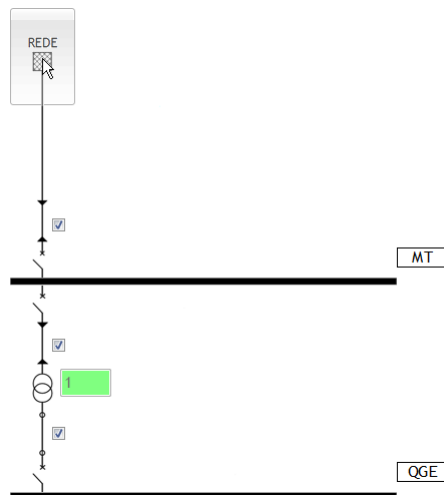


Figura 4.18 - Folha de desenho do formulário principal do *calcicc*: clique sobre a Rede.

Após clicar sobre o equipamento, será apresentado um formulário correspondente às suas características, onde o utilizador pode preencher os dados requeridos. De seguida, serão abordadas as propriedades de todos os equipamentos do *calcicc*.

Rede de MT

Rede de MT

☒ Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$S''kQ_{max}$ [MVA]
☐ Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$S''kQ_{min}$ [MVA]
☐ Corrente Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$I''kQ_{max}$ [kA]
☐ Corrente Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$I''kQ_{min}$ [kA]
Tensão Estipulada*	UnQ [kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	RQ/XQ
Razão entre a Reactância e a Impedância	XQ/ZQ

* Dados de preenchimento obrigatório

Figura 4.19 - Características da Rede de MT.

Neste caso, consoante a informação facultada pelo fornecedor de energia, o utilizador pode optar por preencher os dados referentes às potências de curto-circuito ou referentes às correntes de curto-circuito. Em relação às razões R_Q/X_Q e X_Q/Z_Q , se não for fornecida qualquer informação por parte do utilizador, o programa assume os valores por omissão, segundo a norma IEC 60909-0 ($R_Q/X_Q = 0,1$; $X_Q/Z_Q = 0.995$).

Rede de BT

☒ Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$S''kQ_{max}$	[MVA]
☐ Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$S''kQ_{min}$	[MVA]
☐ Corrente Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$I''kQ_{max}$	[kA]
☐ Corrente Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica*	$I''kQ_{min}$	[kA]
Tensão Estipulada*	Un_Q	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa*	$R(0)/R(1)$	
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa*	$X(0)/X(1)$	
Impedância do Neutro à Terra*	Z_n	[Ω]

* Dados de preenchimento obrigatório

Figura 4.20 - Características da Rede de BT.

Em relação à Rede de BT, para além dos dados igualmente requeridos para a Rede de MT, o utilizador terá de facultar os dados relativos às razões $R_{(0)}/R_{(1)}$, $X_{(0)}/X_{(1)}$ e a Z_n .

Transformador(es) MT/BT

Relativamente aos transformadores MT/BT, o utilizador pode optar por preencher todos os dados manualmente ou realizar uma pesquisa numa base de dados e, escolher o equipamento pretendido. Para efectuar uma pesquisa, terá de clicar no botão "< Pesquisar..." da Figura 4.21, resultando no acesso ao painel da Figura 4.22.

Transformador (MT/BT) Nº 1

Transformador (MT/BT) Nº 1 < Pesquisar...

Modelo* > Guardar...

Fabricante* > Alterar...

Potência Aparente Estipulada* SrT [kVA]

Tensão Estipulada (MT)* UrTHV [kV]

Tensão Estipulada (BT)* UrTLV [kV]

Tensão de Curto-Circuito Estipulada* ukr [%]

Perdas Totais à Corrente Estipulada* PkrT [kW]

Tipo de Ligação* DYN

Impedância do Neutro à Terra* Zn [Ω]

Razão entre a Resistência Homopolar e Directa R(0)/R(1)

Razão entre a Reactância Homopolar e Directa X(0)/X(1)

Regulação de Tensão* +pT -pT [%]

OK Cancelar

* Dados de preenchimento obrigatório

Figura 4.21 - Características do(s) transformador(es) MT/BT.

Base de Dados dos Transformadores

Base de Dados

☒ Base de Dados Padrão

☐ Base de Dados do Utilizador

Pesquisar Modelo

Modelo	Fabricante	SrT [kVA]
TP OLEO DMA TRI POSTE H 10KV 50KVA/EDP005010B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	50
TP OLEO DMA TRI POSTE H 10KV 100KVA/EDP010010B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	100
TP OLEO DMA TRI POSTE H 15KV 50KVA/EDP005015B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	50
TP OLEO DMA TRI POSTE H 15KV 100KVA/EDP010015B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	100
TP OLEO DMA TRI POSTE H 30KV 50KVA/EDP005030B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	50
TP OLEO DMA TRI POSTE H 30KV 100KVA/EDP010030B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	100
TP OLEO DMA TRI CABINA H 10KV 160KVA/EDP016010B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	160
TP OLEO DMA TRI CABINA H 10KV 250KVA/EDP025010B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	250
TP OLEO DMA TRI CABINA H 10KV 400KVA/EDP040010B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	400
TP OLEO DMA TRI CABINA H 10KV 630KVA/EDP063010B420/50Hz	EFACEC ENERGIA	630

Remover

OK Cancelar

Figura 4.22 - Base de Dados dos transformadores.

No formulário da figura anterior, o utilizador pode eleger a base de dados padrão do próprio programa ou a base de dados do utilizador (previamente definida por este). Ainda neste painel, o utilizador pode pesquisar o transformador pelas suas propriedades, acedendo

à caixa de selecção das propriedades, “Modelo” neste caso e, de seguida, preencher a caixa de texto localizada imediatamente a seguir.

Feita a escolha do equipamento pretendido, o utilizador deve clicar no botão “OK” para que as suas características sejam automaticamente transferidas para o formulário da Figura 4.21.

Para remover um transformador da base de dados do utilizador, este deve seleccionar o equipamento pretendido, clicar no botão “Remover” e, de seguida, confirmar a operação.

O utilizador pode ainda, a partir dos botões “> Guardar...” e “> Alterar...”, do painel da Figura 4.21, guardar um novo transformador ou alterar os dados dos transformadores da base de dados do utilizador.

Caso exista mais do que um transformador, o utilizador deve clicar na caixa de selecção, situada no canto superior esquerdo do formulário da Figura 4.21, escolher o transformador desejado e, de seguida, definir as suas características.

Em relação às razões $R_{(0)}/R_{(1)}$ e $X_{(0)}/X_{(1)}$, se não for fornecida qualquer informação por parte do utilizador, o programa assume os valores por omissão, segundo as normas IEC TR 60909-4 e IEC TR 60909-2 ($R_{(0)}/R_{(1)} = 1$; $X_{(0)}/X_{(1)} = 0.95$ ou 0.1 , dependendo do tipo de ligação dos enrolamentos do transformador).

Transformadore(s) BT/MT

Figura 4.23 - Características do(s) transformador(es) BT/MT.

Em relação aos transformadores BT/MT, para além dos dados igualmente requeridos para os transformadores MT/BT, o utilizador terá de facultar os dados relativos à existência de tomadas de regulação de tensão em carga e a que grupo de produção é que pertence o

respectivo transformador (ver Figura 4.23). Se o número de grupos de produção for igual ao número de transformadores BT/MT, o programa assume que o transformador “n” pertence a grupo de produção “n”, tal como na Figura 4.23.

Observando a Figura 4.23, pode-se constatar que também existem as opções de pesquisar, guardar e alterar, abordadas anteriormente.

Geradores na MT

Figura 4.24 - Características do geradores a produzir na MT.

Para o geradores a produzir na MT, o utilizador também pode optar por preencher todos os dados manualmente ou realizar uma pesquisa numa base de dados, e escolher o equipamento pretendido (ver Figura 4.24). As opções de guardar e alterar também estão disponíveis no formulário da Figura 4.24.

Analogamente aos transformadores de BT/MT, o utilizador tem de referir a que grupo de produção é que pertence o respectivo gerador. Mais uma vez, se o número de grupos de produção for igual ao número de geradores a produzir na MT, o programa assume que o gerador “n” pertence a grupo de produção “n”, tal como na Figura 4.24.

Caso o utilizador não tenha informação sobre a potência aparente estipulada do gerador, deverá preencher esse campo, com um valor qualquer superior a zero, de seguida deve facultar os valores da tensão estipulada e do factor de potência estipulado do gerador, para que o botão “Ajuda” seja activado. Clicando nesse botão surgirá o seguinte formulário:

Valores Conhecidos		
☒ Potência Activa Estipulada	PrG	1120 [kW]
☐ Potência Reactiva Estipulada	QrG	840 [kvar]
☐ Corrente Estipulada	IrG	2020.726 [A]
☐ Factor de Potência Estipulado	cosφrG	0.8

OK Cancelar

Figura 4.25 - Formulário de ajuda ao cálculo da potência aparente estipulada do gerador.

No formulário anterior, o utilizador pode optar por preencher os dados relativos à potência activa e reactiva estipulada do gerador ou a corrente estipulada e o factor de potência estipulado do gerador. Qualquer um desses conjuntos de dados permite, clicando no botão “OK”, calcular a potência aparente estipulada do gerador e transferir automaticamente o seu valor para o formulário da Figura 4.24.

Em relação às reactâncias $x_{(2)}$ e x_q'' , se não for fornecida qualquer informação por parte do utilizador, o programa assume os valores por omissão, segundo a norma IEC 60909-0 ($x_q'' = x_d''$; $x_{(2)} = x_d''$). No entanto, se o valor de $x_{(2)}$ não for facultado, mas o valor de x_q'' for conhecido, o programa assume o seguinte valor para $x_{(2)}$, segundo a norma IEC 60909-0: $x_{(2)} = (x_d'' + x_q'')/2$.

Geradores na BT

A definição das características dos geradores a produzir na BT é feita da mesma forma que os geradores a produzir na MT, com a excepção de que os geradores a produzir na BT não pertencem a nenhum grupo de produção, pois o grupo de produção neste caso é o próprio gerador (ver Figura 4.26).

Gerador Nº 1

Gerador Nº 1

< Pesquisar...

Modelo*

> Guardar...

Fabricante*

> Alterar...

Potência Aparente Estipulada* SrG [kVA]

Tensão Estipulada* UrG [V]

Regulação de Tensão* +pG -pG [%]

Factor de Potência Estipulado* cosφrG

Reactância Subtransitória Longitudinal Saturada* xd'' [p.u.]

Reactância Subtransitória Transversal Saturada xq'' [p.u.]

Reactância Inversa Saturada x(2) [p.u.]

Reactância Homopolar* x(0) [p.u.]

Tipo de Ligação* Yn

Impedância do Neutro à Terra* Zn [Ω]

Ajuda

OK Cancelar

* Dados de preenchimento obrigatório

Figura 4.26 - Características dos geradores a produzir na BT.

Motores Assíncronos

Motor Assíncrono Nº 1

Motor Assíncrono Nº 1

< Pesquisar...

Modelo*

> Guardar...

Fabricante*

> Alterar...

Potência Estipulada* PrM [kW]

Tensão Estipulada* UrM [V]

Rendimento Estipulado* ηr [%]

Factor de Potência Estipulado* cosφrM

Razão entre a Corrente de Arranque e Estipulada* ILR/IrM

Velocidade Estipulada nr [rot/min]

Par de Pólos p

OK Cancelar

* Dados de preenchimento obrigatório

Figura 4.27 - Características dos motores assíncronos.

Para os motores assíncronos, o utilizador também pode optar por preencher todos os dados manualmente ou realizar uma pesquisa numa base de dados e, escolher o equipamento

pretendido (ver Figura 4.27). As opções de guardar e alterar também estão disponíveis no formulário da Figura 4.27.

Cabos/Condutores

Cabo do Motor Assíncrono Nº 1

Cabo Nº 1

Designação*

Fabricante

Material

Tipo de Isolamento

Tensão Estipulada

Secção S [mm²]

Resistência Linear Máxima a 20°C* R (20°C) [Ω/km]

Resistência à Tmáx em CC* R(1) [Ω/km]

Reactância Linear* X(1) [Ω/km]

Resistência Homopolar a 20°C* R0 (20°C) [Ω/km]

Resistência Homopolar à Tmáx em CC* R(0) [Ω/km]

Reactância Homopolar* X(0) [Ω/km]

Comprimento* L [km]

* Dados de preenchimento obrigatório

Figura 4.28 - Características dos cabos/condutores.

Relativamente aos cabos/condutores, o processo de definição das suas características é idêntico aos anteriormente mencionados, pois o utilizador também pode optar por preencher todos os dados manualmente ou realizar uma pesquisa numa base de dados e, escolher o cabo/condutor pretendido (ver Figura 4.28). As opções de guardar e alterar também estão disponíveis no formulário da Figura 4.28.

Para o cálculo das resistências dos cabos/condutores à temperatura máxima de curto-circuito, o utilizador deve preencher os dados das resistências à temperatura de 20°C, para que os botões “Ajuda” sejam activados. Ao clicar num desses botões, surgirá o formulário da Figura 4.29. Nesse formulário o utilizador, deverá facultar os dados relativos ao coeficiente de termoresistividade a 20°C do material, assim como a temperatura máxima em curto-circuito que o isolamento suporta. De seguida deve clicar no botão “OK”, para o valor da resistência à temperatura máxima de curto-circuito seja calculado e automaticamente transferido para o formulário da Figura 4.28.

Voltando a examinar a Figura 4.3, constata-se que existem umas caixas de verificação na folha de desenho, do lado direito de cada cabo/condutor. Essas caixas de verificação servem para o utilização activar ou desactivar a contribuição do respectivo cabo/condutor no cálculo das correntes de curto-circuitos.

Material / Tipo de Cabo	Valor
Coefficiente de Termoresistividade a 20°C do Cobre	$\alpha = 0.00395 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$
Coefficiente de Termoresistividade a 20°C do Alumínio	$\alpha = 0.00380 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$
Temperatura Máxima em Curto-Circuito - PVC ($\leq 300\text{mm}^2$)	$\theta_2 = 160 \text{ [}^\circ\text{C}\text{]}$
Temperatura Máxima em Curto-Circuito - PVC ($> 300\text{mm}^2$)	$\theta_2 = 140 \text{ [}^\circ\text{C}\text{]}$
Temperatura Máxima em Curto-Circuito - XLPE / PEX	$\theta_2 = 250 \text{ [}^\circ\text{C}\text{]}$
Temperatura Máxima em Curto-Circuito - EPR	$\theta_2 = 250 \text{ [}^\circ\text{C}\text{]}$

Figura 4.29 - Formulário de ajuda ao cálculo da resistência do cabo/condutor, à temperatura máxima de curto-circuito.

Em todos os formulários correspondentes às características dos equipamentos, depois do utilizador preencher os dados requeridos, deve clicar no Botão “OK” para que as propriedades do equipamento em questão sejam guardadas.

4.1.5 - Relatório Final

Depois de definidas as características de todos os equipamentos eléctricos, que constituem o esquema unifilar da instalação eléctrica, o utilizador pode finalmente proceder à obtenção dos resultados das correntes de curto-circuito no QGE. Existem duas formas de conseguir os respectivos resultados:

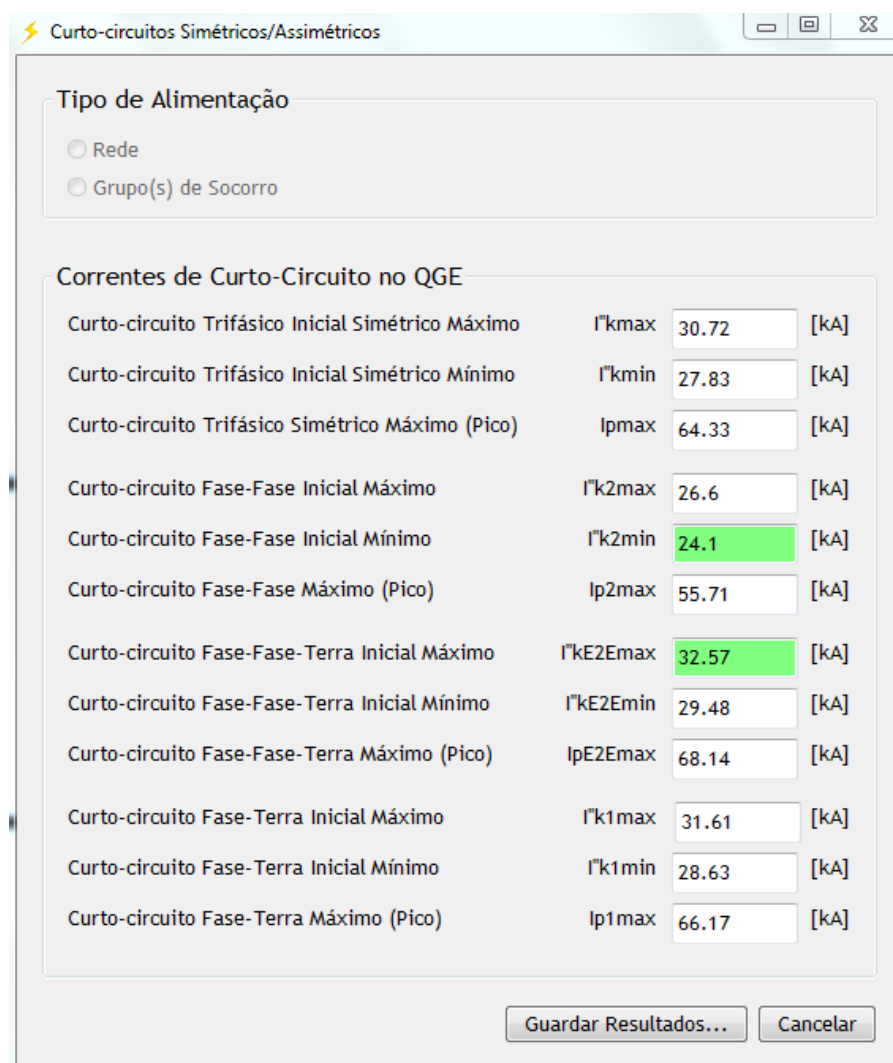
- Aceder ao menu “Dimensionar”, da Figura 4.3 e, clicar sobre o submenu “Calcular Curto-Circuitos”;
- Clicar no ícone  da barra de ferramentas da Figura 4.3.

Após o programa realizar o processo de cálculo ilustrado pelos fluxogramas da Figura 4.31 e Figura 4.32, surgirá o formulário de apresentação de resultados da Figura 4.30.

No exemplo utilizado para obter os resultados da Figura 4.30, a Rede está a funcionar em paralelo com o gerador (Rede c/Autoprodução), de maneira que os resultados obtidos são, a soma das correntes de curto-circuito parciais dos dois ramos. Para obter as correntes de curto-circuito parciais de cada ramo individualmente, o utilizador teria de clicar no botão “Cancelar” da Figura 4.30, modificar a caixa de selecção, situada no canto superior direito da Figura 4.5, para “Rede c/Socorrido” e, clicar no ícone  da barra de ferramentas da Figura 4.3. Isso permitiria que o grupo de opções “Tipo de Alimentação” da Figura 4.30 fosse activado, possibilitando o utilizador de escolher a que ramo é que os resultados estão associados.

Depois do utilizador obter os resultados pretendidos, pode guardar um relatório final, em formato “.txt”, onde estarão descritos os dados de definição do projecto, o valor das respectivas correntes de curto-circuito no QGE e ainda a lista do material eléctrico envolvido, assim como as suas características (ver Anexo A). Para obter o referido relatório, o utilizador terá de clicar no botão “Guardar Resultados...”, da Figura 4.30, e seleccionar o endereço pretendido.

Após guardar um projecto, o utilizador pode alterar qualquer propriedade deste, por exemplo, as características de equipamentos e/ou tipos de fontes de alimentação e, de seguida, voltar a calcular as correntes de curto-circuito.



Curto-circuitos Simétricos/Assimétricos

Tipo de Alimentação

☐ Rede

☐ Grupo(s) de Socorro

Correntes de Curto-Circuito no QGE

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo	I''_{kmax}	30.72	[kA]
Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo	I''_{kmin}	27.83	[kA]
Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico)	I_{pmax}	64.33	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo	I''_{k2max}	26.6	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo	I''_{k2min}	24.1	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico)	I_{p2max}	55.71	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo	$I''_{kE2Emax}$	32.57	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo	$I''_{kE2Emin}$	29.48	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico)	$I_{pE2Emax}$	68.14	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo	I''_{k1max}	31.61	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo	I''_{k1min}	28.63	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico)	I_{p1max}	66.17	[kA]

Guardar Resultados... Cancelar

Figura 4.30 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE.

4.1.6 - Fluxogramas do Programa Desenvolvido

A Figura 4.31 e a Figura 4.32 ilustram os fluxogramas referentes ao algoritmo de cálculo implementado no *calcicc*. O fluxograma da Figura 4.31 explicita o processo de determinação das impedâncias de curto-circuito dos diversos equipamentos que constituem a instalação. Quanto ao fluxograma da Figura 4.32, descreve o processo de cálculo das correntes de curto-circuito no QGE.

A Figura 4.33 ilustra o organigrama que explicita o modo de funcionamento do *calcicc*.

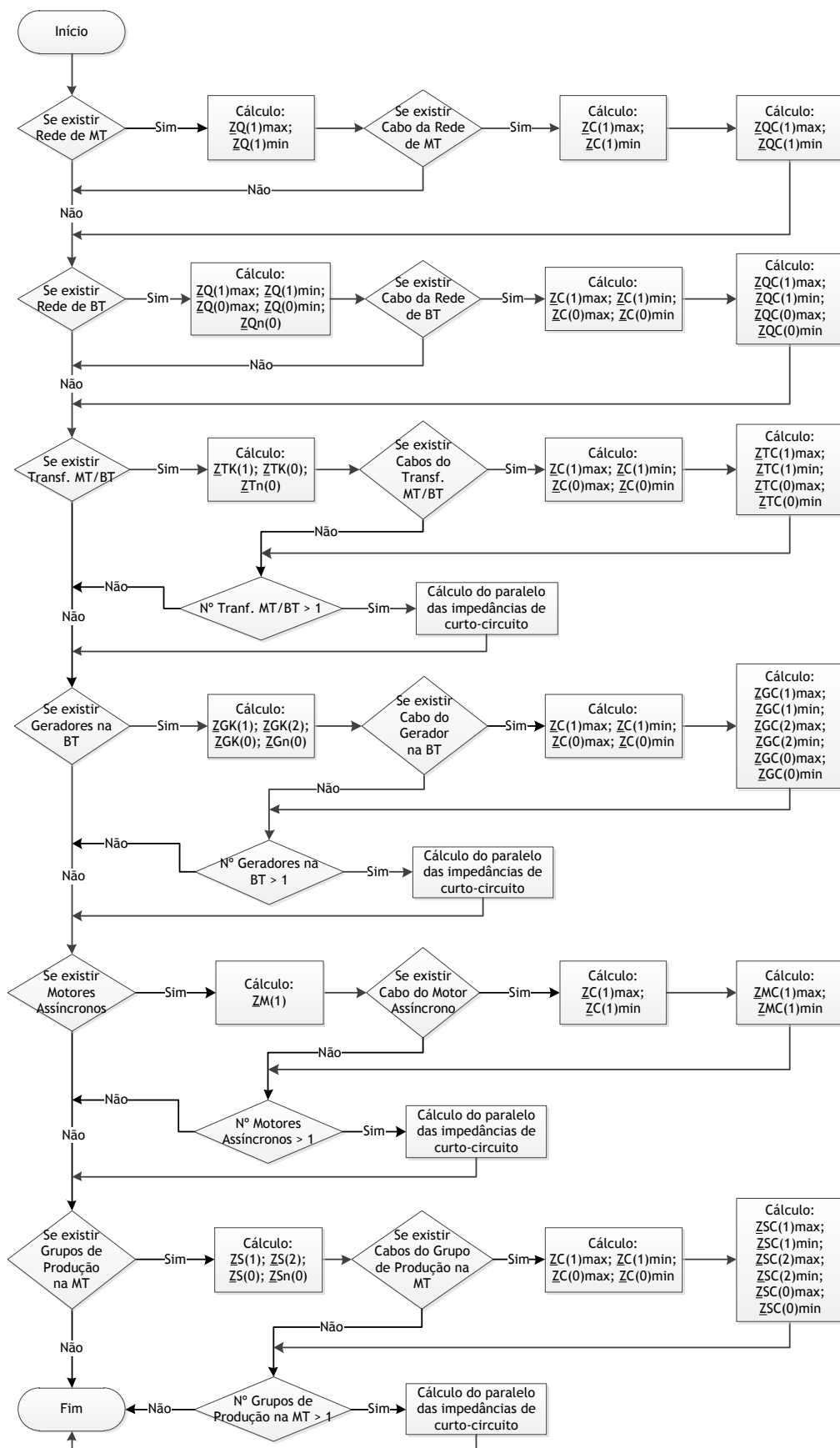


Figura 4.31 - Algoritmo de cálculo das impedâncias de curto-circuito do equipamento eléctrico, implementado no *calcicc*.

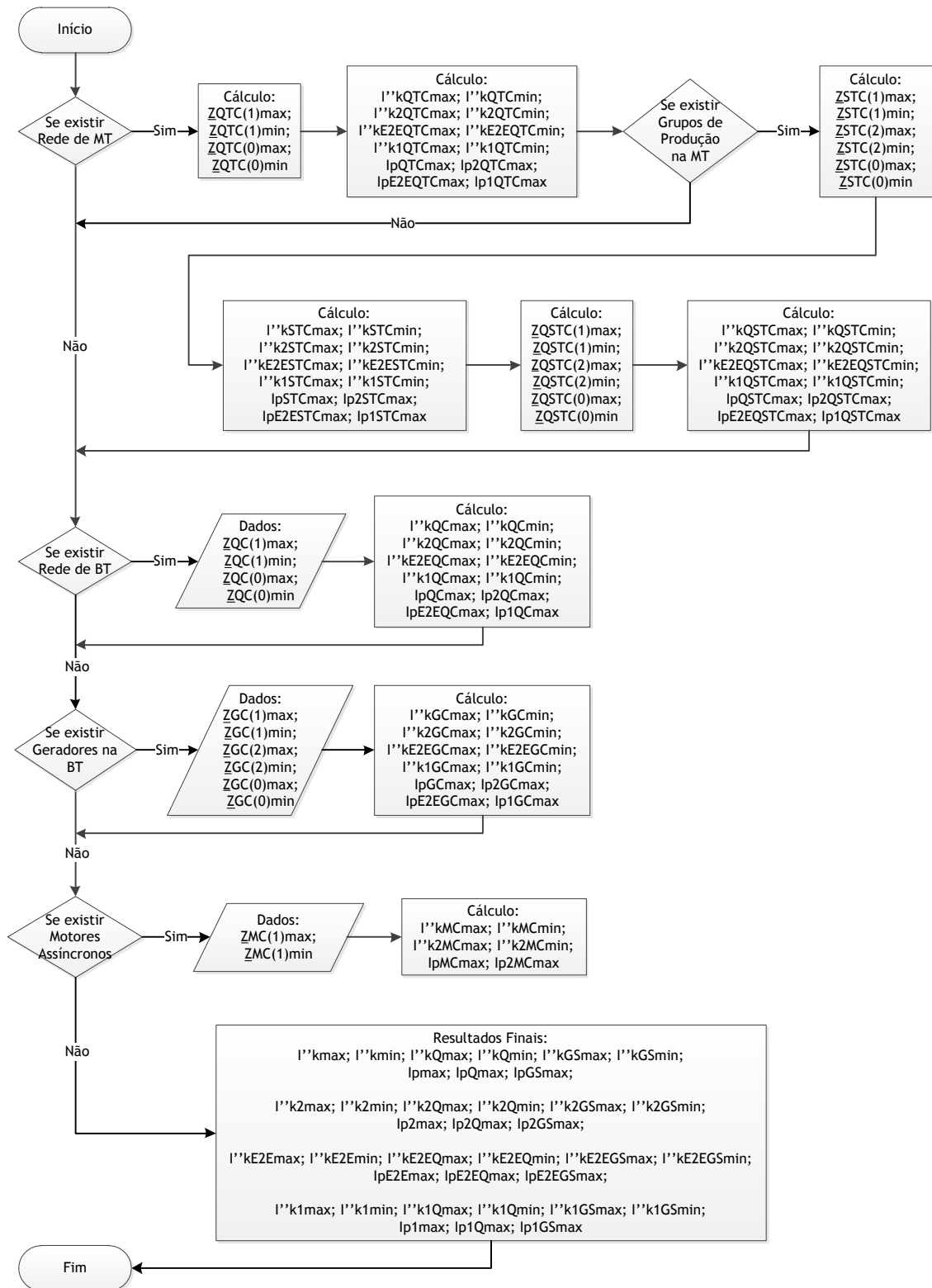


Figura 4.32 - Algoritmo de cálculo dos curto-circuitos simétricos/assimétricos, implementado no *calcicc*.

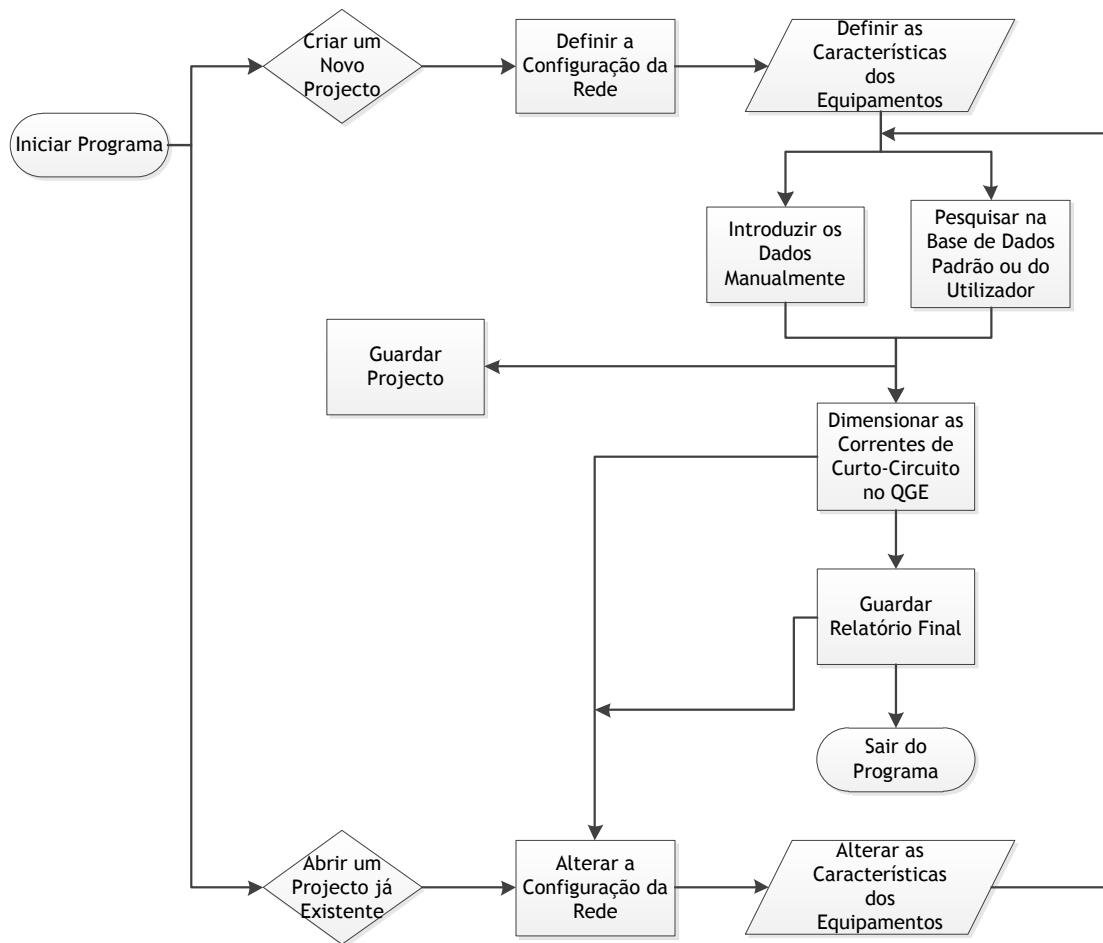


Figura 4.33 - Modo de funcionamento do *calcicc*.

4.2 - Conclusões

O *calcicc* determina curto-circuitos simétricos e assimétricos (máximos e mínimos) no quadro geral de entrada em edifícios do sector terciário e industrial. Permite inserir inúmeras configurações de fontes de alimentação na instalação eléctrica, nomeadamente:

- Rede de MT;
- Rede de BT;
- Rede de MT em paralelo com Grupos de Produção a produzir na MT;
- Rede de MT socorrida por Grupos de Socorro a produzir na MT;
- Rede de MT em paralelo com Geradores a produzir na BT;
- Rede de MT socorrida por Grupos de Socorro a produzir na BT;
- Rede de BT socorrida por Grupos de Socorro a produzir na BT.

Relativamente a cargas, o *calcicc* permite introduzir motores assíncronos alimentados pelo QGE. No cálculo das correntes de curto-circuito máximas, este considera a contribuição dos respectivos motores.

Os formulários de definição das características dos equipamentos eléctricos permitem inserir os dados manualmente ou pela pesquisa numa base de dados. O que torna o processo

muito mais simples e sem qualquer preocupação para o utilizador, em relação a erros de escrita.

O utilizador pode criar a sua própria base de dados de equipamentos eléctricos, o que não limita o programa a uma determinada marca de equipamentos. Embora a base de dados padrão do próprio programa seja constituída por equipamentos de determinadas marcas, também esta pode ser alterada, uma vez que o código da ferramenta se encontra acessível. No entanto, só uma pessoa com conhecimentos adequados a nível de programação é que estará em condições de efectuar a essa alteração.

É possível com o *calcicc*, guardar os resultados obtidos num ficheiro em formado “.txt”, permitindo ao utilizador, posteriormente, visualiza-lo em formato digital ou proceder à sua impressão.

Capítulo 5

Aplicação da Ferramenta Desenvolvida

Após uma análise do software desenvolvido, abordar-se-á neste capítulo a sua aplicação a três exemplos teste. O objectivo consiste pois em comparar os resultados obtidos na resolução dos respectivos exemplos, manualmente e com o programa, por forma verificar a legitimidade dos mesmos.

Por fim, vai solucionar-se um exemplo tipo, com o propósito de demonstrar a aplicação da ferramenta a uma situação real e analisar as suas potencialidades no auxílio ao projectista para elaboração de um projecto eléctrico.

5.1 - Exemplo Teste 1

Observado a Figura 5.1, pode-se constatar que o QGE é alimentado por uma rede de MT interligada a quatro transformadores MT/BT e por três geradores a produzir na BT. Estas fontes de alimentações podem funcionar em paralelo (Rede c/Autoprodução) ou separadamente (Rede c/Socorrido).

Neste exemplo, por uma questão de simplificação na resolução manual e apresentação dos dados do problema, assumiu-se que os transformadores e geradores são todos iguais. Também se desprezou a influência dos cabos/condutores no cálculo das correntes de curto-circuito. Contudo, o *calcicc* também permite a resolução do problema, caso não se pretenda assumir tais considerações.

Os dados do problema estão apresentados na Tabela 5.1.

5.1.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica

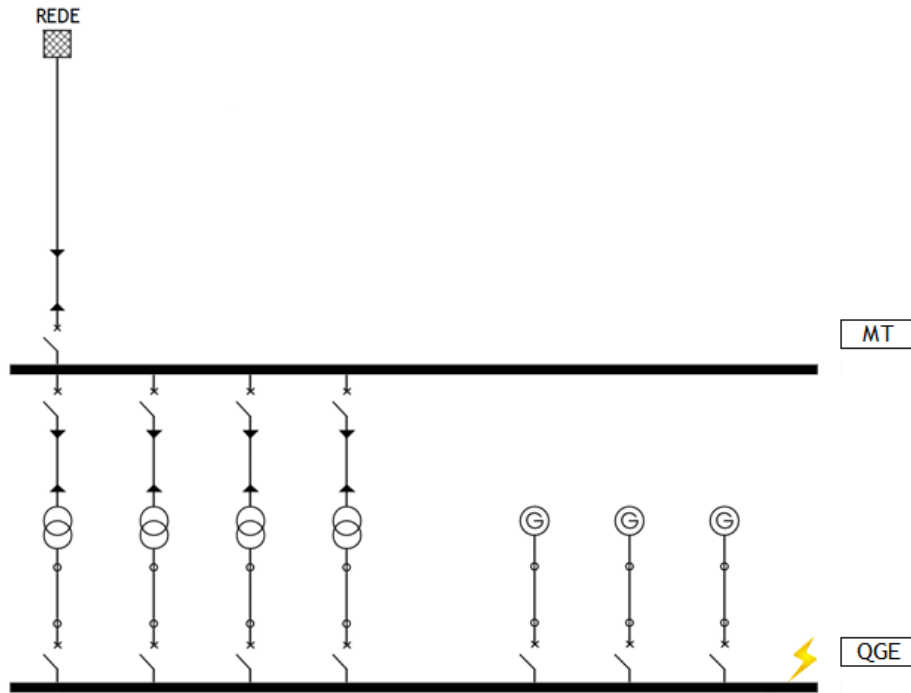


Figura 5.1 - Esquema unifilar da instalação eléctrica do Exemplo Teste 1.

5.1.2 - Dados do Problema

Tabela 5.1 - Dados do problema do Exemplo Teste 1.

Rede			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{k0max}	500	[MVA]
Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{k0min}	350	[MVA]
Tensão Nominal	U_{nQ}	15	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	0.1	-
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	0.995	-
Transformadores MT/BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	800	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	15	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.4	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	6	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	6	[kW]
Tipo de Ligação	DY_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	2.5	[%]

Geradores a produzir na BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rG}	1000	[kVA]
Tensão Estipulada	U_{rG}	400	[V]
Regulação de Tensão	$\pm p_G$	0.5	[%]
Factor de Potência Estipulado	$\cos \varphi_{rG}$	0.8	-
Reactância Subtransitória Longitudinal Saturada	x_d''	0.15	[p.u.]
Reactância Subtransitória Transversal Saturada	x_q''	0.19	[p.u.]
Reactância Inversa Saturada	$x_{(2)}$	0.19	[p.u.]
Reactância Homopolar	$x_{(0)}$	0.02	[p.u.]
Tipo de Ligação	Y_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]

Depois de introduzir os dados do problema no *calcicc* (ver Figura 5.2 e Figura 5.3), obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6.

Os resultados da Figura 5.4 foram obtidos assumindo que a Rede de MT está a funcionar em paralelo com os Geradores a produzir na BT - Rede c/Autoprodução (ver Figura 5.2) - por exemplo, co-geração.

Quanto aos resultados da Figura 5.5 e Figura 5.6, foram obtidos assumindo que a Rede de MT é socorrida pelos Grupos de Socorro a produzir na BT - Rede c/Socorrido (ver Figura 5.3).

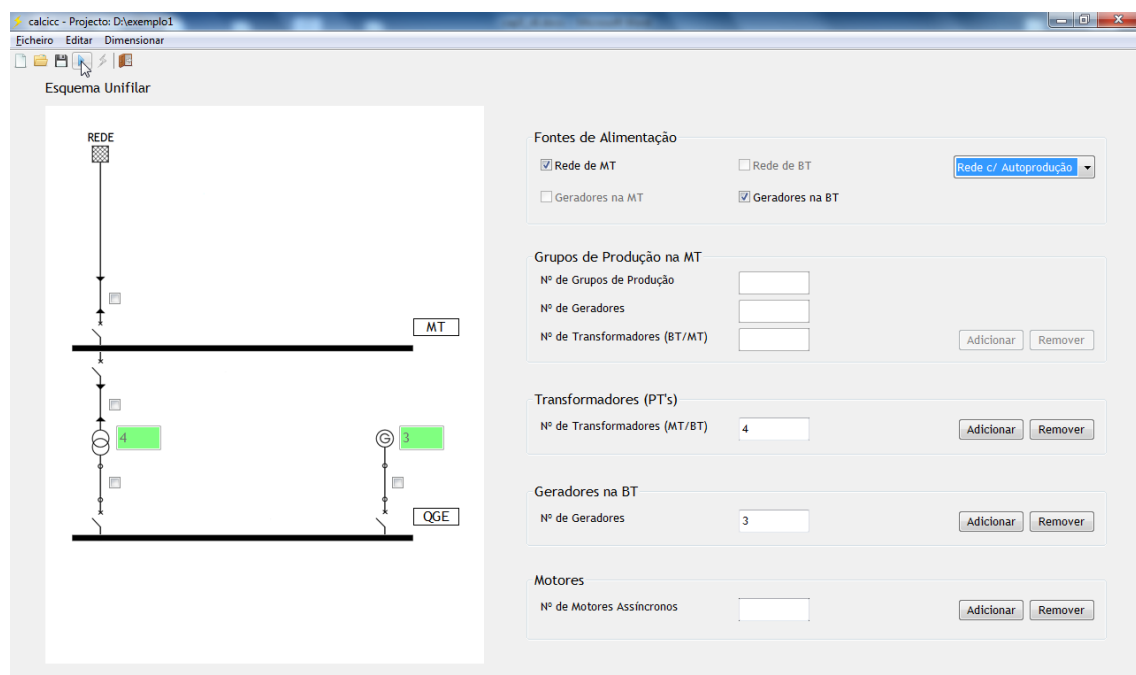


Figura 5.2 - Exemplo Teste 1: Rede de MT a funcionar em paralelo com os Geradores a produzir na BT - Rede c/Autoprodução.

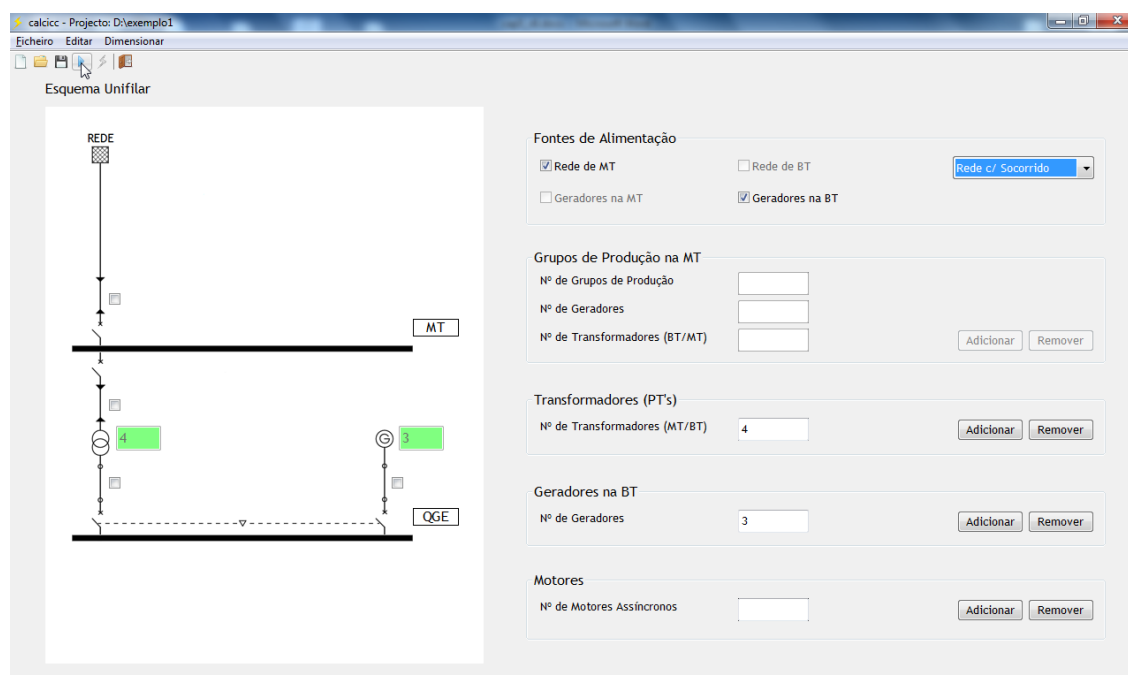


Figura 5.3 - Exemplo Teste 1: Rede de MT socorrida pelos Grupos de Socorro a produzir na BT - Rede c/Socorrido.

5.1.3 - Resultados Obtidos com o *calcicc*

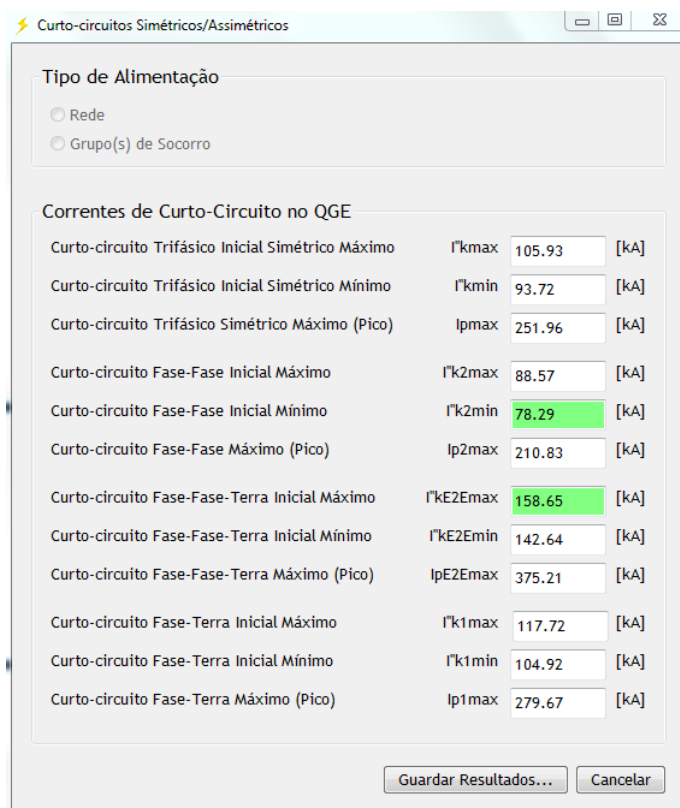


Figura 5.4 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: contribuição da Rede de MT a funcionar em paralelo com os Geradores a produzir na BT.

Curto-circuitos Simétricos/Assimétricos

Tipo de Alimentação

☒ Rede
☐ Grupo(s) de Socorro

Correntes de Curto-Circuito no QGE

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo	I''_{kmax}	74.81	[kA]
Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo	I''_{kmin}	65.56	[kA]
Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico)	I_{pmax}	179.58	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo	I''_{k2max}	64.79	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo	I''_{k2min}	56.78	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico)	I_{p2max}	155.52	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo	$I''_{kE2Emax}$	83.28	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo	$I''_{kE2Emin}$	74.45	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico)	$I_{pE2Emax}$	199.89	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo	I''_{k1max}	78.82	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo	I''_{k1min}	69.72	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico)	I_{p1max}	189.19	[kA]

Guardar Resultados... Cancelar

Figura 5.5 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição da Rede de MT.

Curto-circuitos Simétricos/Assimétricos

Tipo de Alimentação

☐ Rede
☒ Grupo(s) de Socorro

Correntes de Curto-Circuito no QGE

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo	I''_{kmax}	31.12	[kA]
Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo	I''_{kmin}	28.15	[kA]
Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico)	I_{pmax}	72.39	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo	I''_{k2max}	23.78	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo	I''_{k2min}	21.51	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico)	I_{p2max}	55.31	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo	$I''_{kE2Emax}$	75.37	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo	$I''_{kE2Emin}$	68.19	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico)	$I_{pE2Emax}$	175.32	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo	I''_{k1max}	38.9	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo	I''_{k1min}	35.19	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico)	I_{p1max}	90.48	[kA]

Guardar Resultados... Cancelar

Figura 5.6 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição dos Grupos de Socorro a produzir na BT.

Relativamente aos resultados obtidos manualmente, são os mesmos que os referidos na Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6, o que implicou a omissão da sua apresentação repetida. No entanto, para a verificação da sua legitimidade, os cálculos manuais, efectuados segundo a fundamentação teórica do Capítulo 3, podem ser consultados no Anexo B.

5.2 - Exemplo Teste 2

Examinando a Figura 5.7, verifica-se que o QGE é alimentado por uma rede de MT e por três grupos de produção a produzir na MT, interligados a quatro transformadores MT/BT. Este conjunto de fontes de alimentação também pode funcionar em paralelo (Rede c/Autoprodução) ou separadamente (Rede c/Socorrido).

Neste exemplo, tal como no anterior, por uma questão de simplificação na resolução manual e apresentação dos dados do problema, assumiu-se que os transformadores e os geradores são todos iguais. Também se desprezou a influência dos cabos/condutores no cálculo das correntes de curto-circuito. Porém, o *calcicc* também permite a resolução do problema, caso não se pretenda assumir tais considerações.

Os dados do problema estão apresentados na Tabela 5.2.

5.2.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica

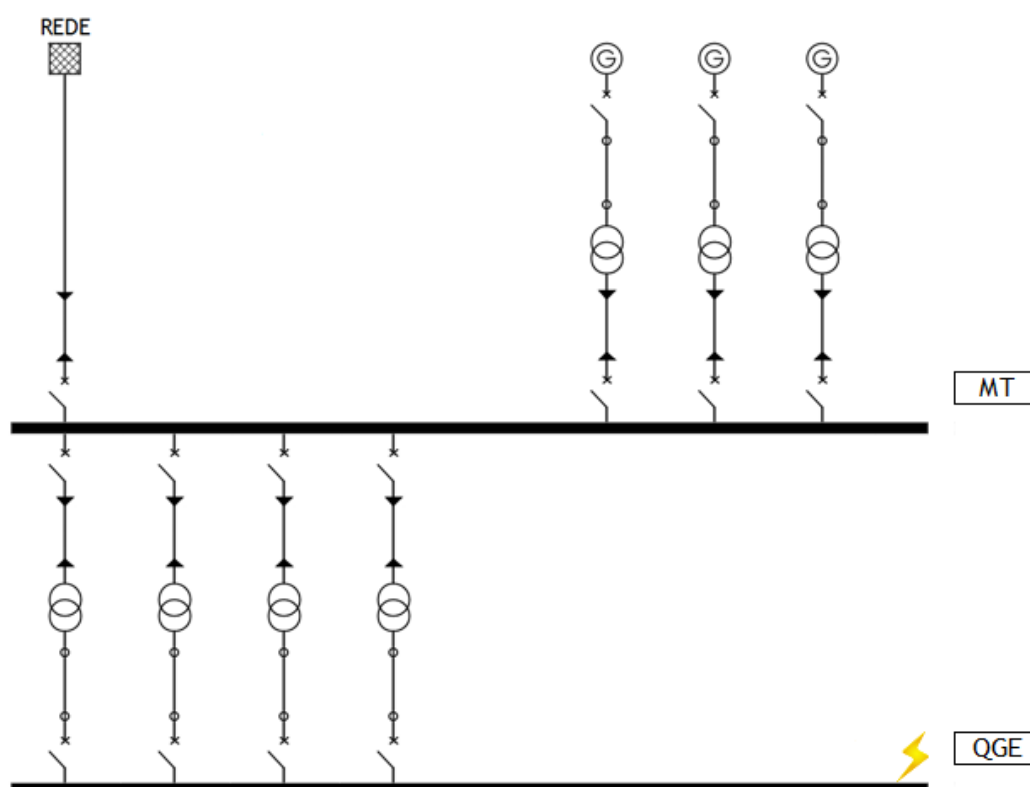


Figura 5.7 - Esquema unifilar da instalação eléctrica do Exemplo Teste 2.

5.2.2 - Dados do Problema

Tabela 5.2 - Dados do problema do Exemplo Teste 2.

Rede			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmax}	500	[MVA]
Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmin}	350	[MVA]
Tensão Nominal	U_{nQ}	15	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	0.1	-
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	0.995	-
Transformadores MT/BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	800	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	15	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.4	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	6	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	6	[kW]
Tipo de Ligação	DY_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	2.5	[%]
Geradores a produzir na MT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rG}	1000	[kVA]
Tensão Estipulada	U_{rG}	400	[V]
Regulação de Tensão	$\pm p_G$	0.5	[%]
Factor de Potência Estipulado	$\cos \varphi_{rG}$	0.8	-
Reactância Subtransitória Longitudinal Saturada	x''_d	0.15	[p.u.]
Reactância Subtransitória Transversal Saturada	x''_q	0.19	[p.u.]
Reactância Inversa Saturada	$x_{(2)}$	0.19	[p.u.]
Reactância Homopolar	$x_{(0)}$	0.02	[p.u.]
Tipo de Ligação	Y_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Transformadores BT/MT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	1250	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	15	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.4	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	6	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	9.5	[kW]
Tipo de Ligação	$Y_n D$	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-

Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	2.5	[%]
Tomadas de Regulação em Carga	Sim	-	-

Depois de introduzir os dados do problema no *calcicc* (ver Figura 5.8 e Figura 5.9), obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12.

Os resultados da Figura 5.10 foram obtidos assumindo que a Rede de MT está a funcionar em paralelo com os Grupos de Produção a produzir na MT - Rede c/Autoprodução (ver Figura 5.8) - por exemplo, co-geração.

Quanto aos resultados da Figura 5.11 e Figura 5.12, foram obtidos assumindo que a Rede de MT é socorrida pelos Grupos de Socorro a produzir na MT - Rede c/Socorrido (ver Figura 5.9).

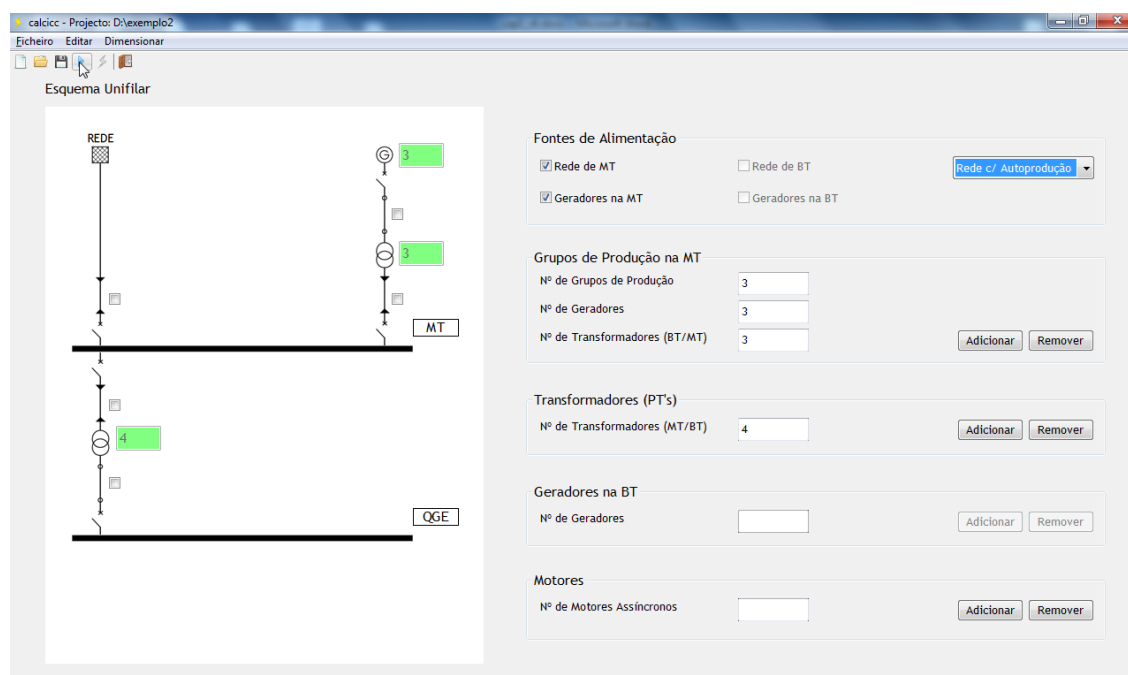


Figura 5.8 - Exemplo Teste 2: Rede de MT a funcionar em paralelo com os Grupos de Produção a produzir na MT - Rede c/Autoprodução.

Em relação aos resultados obtidos manualmente, tal como no Exemplo Teste 1, são iguais aos adquiridos pelo *calcicc*, o que implicou a omissão da sua representação, como antes. Porém, os cálculos justificativos também podem ser consultados no Anexo C.

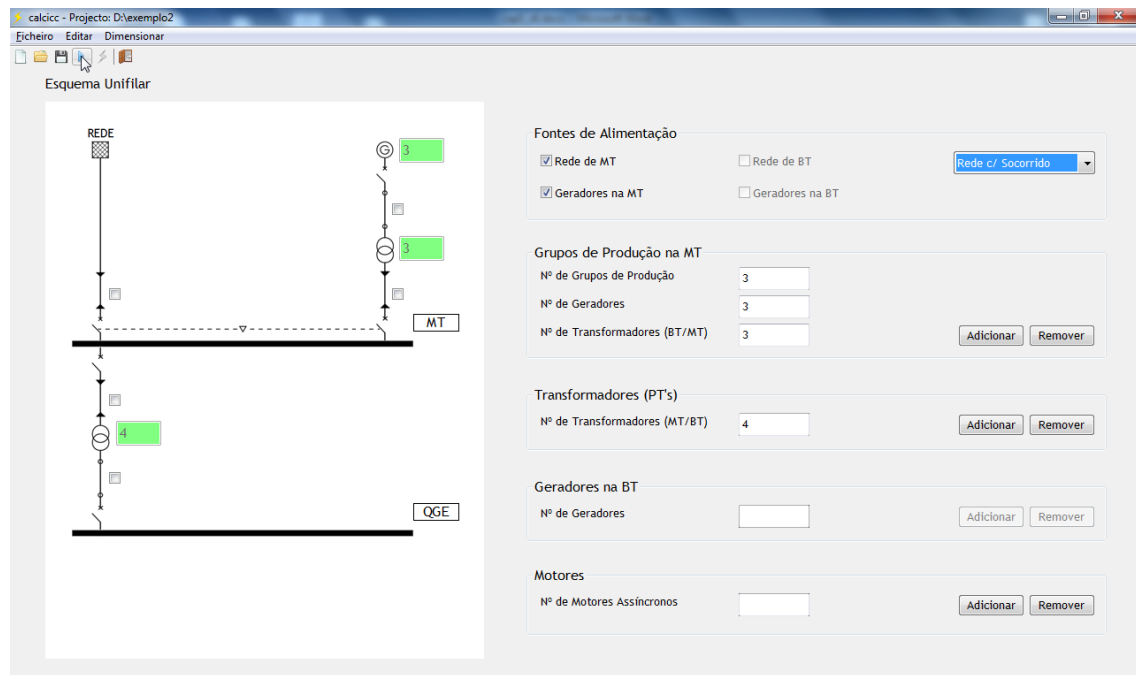


Figura 5.9 - Exemplo Teste 2: Rede de MT socorrida pelos Grupos de Socorro a produzir na MT - Rede c/Socorrido.

5.2.3 - Resultados Obtidos com o *calcicc*

Curto-circuitos Simétricos/Assimétricos

Tipo de Alimentação

☐ Rede

☐ Grupo(s) de Socorro

Correntes de Curto-Circuito no QGE

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo	I''_{kmax}	75.08	[kA]
Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo	I''_{kmin}	65.93	[kA]
Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico)	I_{pmax}	180.15	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo	I''_{k2max}	65	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo	I''_{k2min}	57.07	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico)	I_{p2max}	155.97	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo	$I''_{kE2Emax}$	83.4	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo	$I''_{kE2Emin}$	74.63	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico)	$I_{pE2Emax}$	200.13	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo	I''_{k1max}	79	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo	I''_{k1min}	69.98	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico)	I_{p1max}	189.56	[kA]

Guardar Resultados... Cancelar

Figura 5.10 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: contribuição da Rede de MT a funcionar em paralelo com os Grupos de Produção a produzir na MT.

Curto-circuitos Simétricos/Assimétricos

Tipo de Alimentação

☒ Rede
☐ Grupo(s) de Socorro

Correntes de Curto-Circuito no QGE

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo	I''_{kmax}	74.81	[kA]
Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo	I''_{kmin}	65.56	[kA]
Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico)	I_{pmax}	179.58	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo	I''_{k2max}	64.79	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo	I''_{k2min}	56.78	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico)	I_{p2max}	155.52	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo	$I''_{kE2Emax}$	83.28	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo	$I''_{kE2Emin}$	74.45	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico)	$I_{pE2Emax}$	199.89	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo	I''_{k1max}	78.82	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo	I''_{k1min}	69.72	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico)	I_{p1max}	189.19	[kA]

Guardar Resultados... Cancelar

Figura 5.11 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição da Rede de MT.

Curto-circuitos Simétricos/Assimétricos

Tipo de Alimentação

☐ Rede
☒ Grupo(s) de Socorro

Correntes de Curto-Circuito no QGE

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo	I''_{kmax}	17.97	[kA]
Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo	I''_{kmin}	16.26	[kA]
Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico)	I_{pmax}	42.25	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo	I''_{k2max}	14.41	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo	I''_{k2min}	13.04	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico)	I_{p2max}	33.89	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo	$I''_{kE2Emax}$	39.09	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo	$I''_{kE2Emin}$	35.36	[kA]
Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico)	$I_{pE2Emax}$	91.91	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo	I''_{k1max}	22.82	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo	I''_{k1min}	20.64	[kA]
Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico)	I_{p1max}	53.65	[kA]

Guardar Resultados... Cancelar

Figura 5.12 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Contribuição dos Grupos de Socorro a produzir na MT.

5.3 - Exemplo Teste 3

Analisando a Figura 5.13, pode-se constatar que o QGE é alimentado por uma rede de MT interligada a um transformador MT/BT e que este, por sua vez, alimenta um motor assíncrono.

Mais uma vez, por uma questão de simplificação na resolução manual do problema, desprezou-se a influência dos cabos/condutores no cálculo das correntes de curto-circuito. No entanto, tal como nos exemplos anteriores, o *calcicc* também permite a resolução do problema, caso não se pretenda assumir essa consideração.

Os dados do problema estão apresentados na Tabela 5.3.

5.3.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica

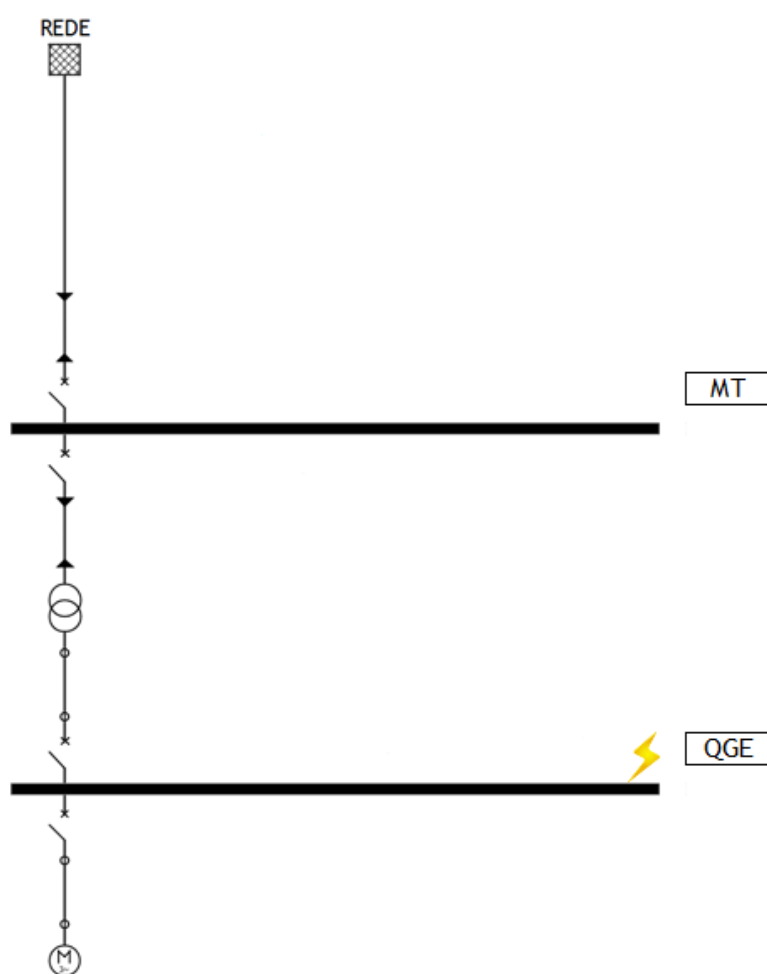


Figura 5.13 - Esquema unifilar da instalação eléctrica do Exemplo Teste 3.

5.3.2 - Dados do Problema

Tabela 5.3 - Dados do problema do Exemplo Teste 3.

Rede			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmax}	150	[MVA]
Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmin}	100	[MVA]
Tensão Nominal	U_{nQ}	10	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	0.1	-
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	0.995	-
Transformador MT/BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	400	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	10	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.42	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	4	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	4.375	[kW]
Tipo de Ligação	DY_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	5	[%]
Motor Assíncrono			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Estipulada	P_{rM}	55	[kW]
Tensão Estipulada	U_{rM}	400	[V]
Rendimento Estipulado	η_r	95.3	[%]
Factor de Potência Estipulado	$\cos \varphi_{rM}$	0.86	-
Razão entre a Corrente de Arranque e Estipulada	I_{LR}/I_{rM}	7.9	-
Velocidade Estipulada	n_r	1480	[rot/min]
Par de Pólos	p	2	-

Depois de introduzir os dados do problema no *calcicc* (ver Figura 5.14), obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.15.

Relativamente aos resultados obtidos manualmente, mais uma vez, são idênticos aos adquiridos pelo *calcicc*, o que implicou a omissão da sua representação repetida. No entanto, os cálculos manuais também podem ser consultados no Anexo D.

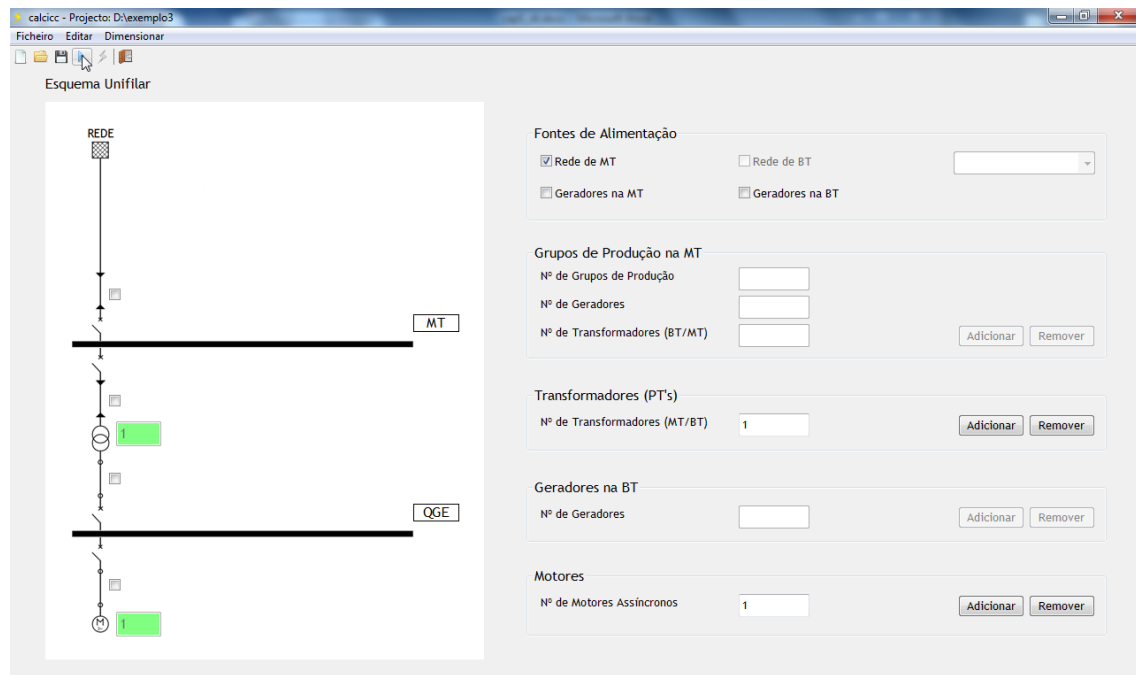


Figura 5.14 - Exemplo Teste 3 exposto no *calcicc*.

5.3.3 - Resultados Obtidos com o *calcicc*



Figura 5.15 - Curto-Circuitos Simétricos/Assimétricos no QGE: Exemplo Teste 3

5.4 - Exemplo Tipo

5.4.1 - Especificação do Problema

Segundo a Empresa (FASE - Estudos e Projectos S.A.), uma das aplicações em que suscitou grande interesse a utilização do *calcicc* consistiu na elaboração de um projecto eléctrico de um *Data Center*.

Criou-se assim um exemplo tipo que considerou um edifício com 1250 m². Uma vez que por cada metro quadrado um *Data Center* consome normalmente 2 kVA, o nosso edifício terá como consumo total 2500 kVA.

Sendo o *Data Center* um edifício que necessita de alimentação redundante, este será alimentado por duas vias. A “via A” provém de uma “subestação A” que, por sua vez, interliga a um “PT A” constituído por quatro transformadores MT/BT de 1250 kVA (o quarto transformador é considerado um equipamento redundante). A “via B”, idealmente, provém de uma subestação diferente - “subestação B” - que, por sua vez, interliga a um “PT B”, idêntico ao primeiro.

Apesar dessas duas vias garantirem uma alimentação redundante do edifício, como normalmente um *Data Center* detém um sistema de co-geração com a vantagem adicional de utilizar os mesmos grupos para socorrer o *Data Center*, esse sistema funciona como uma terceira via de alimentação. Neste caso, o sistema de co-geração é constituído por três grupos de 1000 kVA, sendo o terceiro grupo considerado um equipamento redundante.

Em funcionamento normal do *Data Center*, a *via A* alimentará um QGE1, a *via B* alimentará um QGE2 e o sistema de co-geração estará, necessariamente, a produzir energia para vender ao distribuidor. O QGE1 e o QGE2, apesar de serem quadros eléctricos diferentes, estão a alimentar as mesmas cargas.

Caso exista uma falha de alimentação proveniente da *via A*, da *via B* ou de ambas, o sistema de co-geração passará a funcionar como grupo de socorro, sendo que 500 kVA são deslustráveis na situação de ambas as vias *A* e *B* falharem e se, simultaneamente, um dos grupos de socorro ficar também fora de serviço.

Em termos de fiabilidade na alimentação das cargas críticas, era preferível ter os grupos de socorro directamente ligados ao QGE (QGE1 e QGE2), pois mesmo que surja uma falha nos PT's de ambas as vias *A* e *B*, por exemplo proveniente de um incêndio, os grupos de socorro não são afectados e podem funcionar normalmente (ver Figura 5.1). Porém, a aparelhagem de corte e protecção de BT existente no mercado está limitada a um determinado valor de poder de corte, valor esse que, por vezes, é superado pelos elevados valores de correntes de curto-circuito que surgem quando se opta por colocar o sistema de co-geração a produzir na BT. Elevados valores de correntes de curto-circuito também condicionam a segurança das pessoas e a exploração segura da instalação.

Ao optar por instalar os grupos de socorro a produzir na média tensão, envolve instalar transformadores elevadores (por exemplo três transformadores BT/MT de 1250 kVA) e, caso surja uma falha nos PT's de ambas as vias *A* e *B*, por exemplo resultante de um incêndio, os grupos de socorro não podem socorrer a instalação pois estariam, evidentemente, a agravar a situação de defeito (ver Figura 5.7), ou seja, contribuiriam para menor fiabilidade na alimentação das cargas críticas.

5.4.2 - Aplicação do *calcicc*

O projectista tem então de decidir onde instalar o sistema de co-geração (que funcionará também como grupo de socorro, como dito), mediante as implicações que podem surgir ao nível do valor das correntes de curto-circuito no QGE e da fiabilidade na alimentação das cargas críticas.

Para tomar tal decisão, o projectista teria de começar por calcular o valor da correntes de curto-circuito no QGE, para os cenários de alimentação ilustrados na Figura 5.1 e Figura 5.7.

Se os cálculos fossem efectuados manualmente, para além de condicionarem o tempo de elaboração do projecto, poderiam surgir erros de cálculo que poderiam conduzir a uma decisão errada. Nesse sentido, o *calcicc* é uma mais valia para o projectista, pois os respectivos cálculos são feitos rapidamente e de forma automática, permitindo analisar comodamente o cenário mais favorável.

Como era de esperar, analisando a Figura 5.4 e a Figura 5.10 verifica-se que ao instalar o sistema de co-geração na BT, os valores das correntes de curto-circuito são superiores ao caso do sistema de co-geração estar a produzir na MT. No entanto, com auxílio ao *calcicc*, o projectista pode alterar as características dos equipamentos e efectuar sucessivas simulações, para atenuar os valores dessas correntes de curto-circuito, sempre com grande comodidade e velocidade.

O *calcicc*, para além de determinar o poder de corte da aparelhagem de protecção a instalar no QGE, também dimensiona a sensibilidade de actuação dessa mesma aparelhagem uma vez que calcula correntes de curto-circuito mínimas.

Capítulo 6

Conclusões

A elaboração do presente projecto surgiu de uma necessidade da empresa FASE - Estudos e Projectos S.A. em otimizar um processo de cálculo de correntes de curto-circuito, que se demonstra bastante moroso e trabalhoso, se realizado manualmente.

O problema consistiu em determinar as correntes de curto-circuito máximas e mínimas, num determinado quadro geral de entrada de um edifício do sector terciário ou industrial. Esse quadro eléctrico, por sua vez, pode ser alimentado por várias configurações de fontes de alimentação, nomeadamente:

- Por uma Rede de MT a funcionar em paralelo com um sistema de co-geração a produzir na média ou baixa tensão;
- Por uma Rede de MT socorrida por grupos de socorro a produzir na média ou baixa tensão;
- Ou, ainda, por uma Rede de BT socorrida por grupos de socorro a produzir na baixa tensão.

Existem diversas ferramentas informáticas no mercado, de auxílio ao projectista na elaboração deste tipo de projectos eléctricos. Essas ferramentas são muito completas em relação ao dimensionamento de instalações eléctricas, oferecendo resultados com elevada qualidade e de muita utilidade. Contudo, quando se pretendem calcular correntes de curto-circuito num determinado QGE alimentado por algumas das configurações de fontes de alimentação referidas, nenhum desses softwares permite obter os resultados pretendidos, implicando a realização dos cálculos manualmente.

Assim, para suprimir as limitações impostas pelas tais aplicações informáticas e com o intuito de otimizar o tempo de elaboração do respectivo projecto eléctrico, elaborou-se uma aplicação informática que efectua o cálculo das correntes de curto-circuito de forma automática e que acomoda todas as configurações de fontes de alimentação do QGE requeridas.

A ferramenta de cálculo desenvolvida determina valores máximos, mínimos e de pico das correntes de curto-circuito. As correntes de curto-circuito máximas permitem determinar o poder de corte da aparelhagem de protecção e as correntes de curto-circuito mínimas permitem determinar a sua sensibilidade de actuação, perante o aparecimento de um defeito na instalação eléctrica.

Uma vez que a aplicação desenvolvida permite, a qualquer altura, alterar a configuração das fontes de alimentação do QGE, assim como as propriedades de todos os equipamentos que constituem o esquema unifilar da instalação eléctrica, ela também habilita o projectista, rapidamente, a efectuar sucessivas simulações, para um mesmo problema, para determinar a melhor configuração de fontes de alimentação, tendo em conta o valor das correntes de curto-circuito e a fiabilidade na alimentação das cargas críticas.

Quanto à base de dados do programa, foi incluída a possibilidade de acrescentar novos itens pelo utilizador, não limitando este a uma determinada marca de equipamentos eléctricos, como também era objectivo inicial do trabalho.

O software foi implementado de modo a oferecer uma interface simples e apelativa ao utilizador, realizando os cálculos de forma automática, exigindo unicamente, a definição da configuração da rede e as propriedades dos equipamentos, aspecto que também se pensa ter conseguido satisfatoriamente.

A ferramenta desenvolvida detém pois todas as funcionalidades previstas, com a adição de mais uma, referente à contribuição dos motores assíncronos para o valor das correntes de curto-circuito, que inicialmente não tinha sido considerada. Portanto, pode-se concluir que os objectivos do trabalho a que nos propusemos foram, plenamente atingidos.

Importa ainda referir que todo o processo de elaboração deste trabalho contribuiu para um aprofundamento de conhecimentos do autor em relação à importância das correntes de curto-circuito e aos procedimentos regulamentares para o seu cálculo.

A interacção com a realidade da vida profissional numa empresa, com as complicações e dificuldades que o mundo actual do trabalho apresenta, contribuiu também para o desenvolvimento de uma melhor formação como Engenheiro.

Como perspectivas de trabalhos futuros referentes ao tema, e em continuação do trabalho desenvolvido, sugere-se adicionar ao software desenvolvido novas capacidades, designadamente a consideração da contribuição para o valor das correntes de curto-circuito de motores alimentados na MT, motores síncronos e baterias de condensadores. Também seria interessante melhorar o formato de apresentação dos resultados finais, incluindo a representação do esquema unifilar da instalação eléctrica e os cálculos justificativos.

Noutra perspectiva, seria interessante efectuar um estudo económico relativo a todo o equipamento da instalação eléctrica, no sentido de auxiliar o projectista na decisão de instalar os grupos de socorro ou um sistema de co-geração na média ou na baixa tensão. Necessariamente, esse estudo deveria ser implementado na ferramenta de cálculo desenvolvida e ser reflectido nos resultados finais obtidos pela mesma.

Referências

- [1] Schneider Electric. (2011, 16 de Fevereiro). *Produtos e Serviços > Distribuição eléctrica > Software de Pré-vendas aos Clientes > Calculation of LV electrical installation - My Ecodial L*. Available: www.schneiderelectric.pt
- [2] Schneider Electric. (2011, 16 de Fevereiro). *Electrical design software > My Ecodial L > Frequently Asked Questions for My Ecodial L*. Available: www.soft.schneider-electric.com
- [3] Schneider Electric. (2011, 18 de Fevereiro). *Productos y Servicios > Distribución eléctrica > Software > Software para la ayuda al diseño de instalaciones eléctricas > ID-SPEC*. Available: www.schneiderelectric.es
- [4] Schneider Electric, "ID-Spec Plus, Manual del Usuario V 3.0."
- [5] voltimum. (2011, 17 de Fevereiro). *Pesquisar: docwin > DocWin VERSÃO 3.0*. Available: www.voltimum.pt
- [6] ADDTEC, "D.O.C.Win, A ferramenta ABB para dimensionar suas instalações de forma prática e completa!."
- [7] ABB, "D.C.O.Win, Design Optimisation on Computer, MANUAL DE UTILIZACIÓN," 2002.
- [8] SIEMENS, "SIMARIS design 4.1 basic, Manual do Usuário," 2008.
- [9] J. P. T. Saraiva, "Dimensionamento e Protecção de Canalizações Eléctricas em Baixa Tensão," 2000.
- [10] J. P. S. Paiva, *Redes de energia eléctrica uma análise sistémica*. Lisboa: IST Press, 2005.
- [11] L. M. V. Pinto, *Técnicas e tecnologias em instalações eléctricas*. Porto: CERTIEL - Associação Certificadora de Instalações Eléctricas, 2000.
- [12] M. A. Matos, "Introdução ao Cálculo de Curto-Circuitos Trifásicos Simétricos pela Norma CEI 909," 1996.
- [13] L. M. V. Pinto, *MGCALC*, 2ª ed ed. [S.l.]: Merlin Gerin, 1996.
- [14] O. Guthmann, *Manual de instalações eléctricas* vol. 6ª ed. Porto: Ordem dos Engenheiros - Região Norte, 1982.
- [15] IEC, "60909-0," *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*, ed: 1.0, 2001.
- [16] B. de Metz-Noblat; F. Dumas and C. Poulain, "Calculation of short-circuit currents," 2005.
- [17] C. Moreira, "Análise de Curto-Circuitos Simétricos," 2009/2010.
- [18] IEC, "TR 60909-1," *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0*, ed: 2.0, 2002.
- [19] efacec. (2011, 01 de Abril). *EFACEC DT Transformadores de Distribuição de Energia - Transformadores em Stock*. Available: <http://web.efacec.pt/apps/tdt/tdt.php>
- [20] Schneider Electric. (2011, 01 de Abril). *Products and Services > MV Distribution & Energy Automation > MV Transformers > Minera - Ground Mounted > Tech leaflets*. Available: www.schneider-electric.com
- [21] IEC, "TR 60909-4," *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents*, ed: 1.0, 2000.
- [22] C. Moreira, "Análise de Curto-Circuitos Assimétricos," 2009/2010.

- [23] IEC, "TR 60909-2," *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations* ed: 2.0, 2008.
- [24] ABB, *Electrical installation handbook Protection, control and electrical devices* vol. 6^a ed: ABB SACE, 2010.
- [25] Grupo Cabelte. (2011, 29 de Março). *Cabos de Energia > Cabos de Baixa Tensão*. Available: www.cabelte.pt
- [26] Grupo Cabelte. (2011, 29 de Março). *Cabos de Energia > Cabos de Média Tensão*. Available: www.cabelte.pt
- [27] Schneider Electric. (2011, 30 de Março). *Productos y Servicios > Distribución eléctrica > Canalización eléctrica prefabricada*. Available: www.schneiderelectric.es
- [28] S. A. Solidal-Condutores Eléctricos and S. A. Quintas Quintas-Condutores Eléctricos, *Solidal Condutores Eléctricos, S.A. [guia técnico]* vol. 10^a ed. rev. e actualizada. Porto: Solidal-Condutores Eléctricos, S. A. Quintas & Quintas-Condutores Eléctricos, SA, 2007.
- [29] ECV. (2011, 28 de Março). *Energias > Geradores*. Available: www.ecv.pt
- [30] EA - Engenheiros Associados. (2011, 09 de Março). *Artigos Técnicos > Curto Circuito e Sistemas de Proteção - Cálculos e Dimensionamentos*. Available: www.engenheirosassociados.com.br
- [31] WEG. (2011, 31 de Março). *seleção de produtos > Motores Eléctricos*. Available: www.weg.net/br
- [32] G. G. Seip, *Electrical installations handbook*, 3rd ed. Erlangen Chichester: Publicis MCD Verlag John Wiley & Sons, 2000.
- [33] Portugal. Direcção-Geral de Geologia e Energia, *RTIEBT regras técnicas das instalações eléctricas de baixa tensão* vol. 1^a edição anotada. [S.l.]: Direcção-Geral de Geologia e Energia, 2006.

Anexo A

Relatório Final do *calcicc*

calcicc

Nome do Projecto: -

Descrição do Projecto: -

Localidade: -

Cliente: -

Empresa: -

Projectista: -

Comentário: -

CURTO-CIRCUITOS

Rede c/ Autoprodução:

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo - $I''_{kmax} = 30.72$ [kA]

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo - $I''_{kmin} = 27.83$ [kA]

Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico) - $I_{pmax} = 64.33$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo - $I''_{k2max} = 26.6$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo - $I''_{k2min} = 24.1$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico) - $I_{p2max} = 55.71$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo - $I''_{kE2Emax} = 32.57$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo - $I''_{kE2Emin} = 29.48$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico) - $I_{pE2Emax} = 68.14$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo - $I''_{k1max} = 31.61$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo - $I''_{k1min} = 28.63$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico) - $I_{p1max} = 66.17$ [kA]

Rede c/ Socorrido:

Alimentação proveniente da Rede

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo - $I''_{kmax} = 24.77$ [kA]

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo - $I''_{kmin} = 22.45$ [kA]

Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico) - $I_{pmax} = 50.5$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo - $I''_{k2max} = 21.45$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo - $I''_{k2min} = 19.44$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico) - $I_{p2max} = 43.73$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo - $I''_{kE2Emax} = 26.51$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo - $I''_{kE2Emin} = 24$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico) - $I_{pE2Emax} = 54.06$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo - $I''_{k1max} = 25.61$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo - $I''_{k1min} = 23.2$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico) - $I_{p1max} = 52.22$ [kA]

Alimentação proveniente dos Grupos de Socorro

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo - $I''_{kmax} = 5.95$ [kA]

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo - $I''_{kmin} = 5.38$ [kA]

Curto-circuito Trifásico Simétrico Máximo (Pico) - $I_{pmax} = 13.84$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo - $I''_{k2max} = 5.15$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo - $I''_{k2min} = 4.66$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase Máximo (Pico) - $I_{p2max} = 11.98$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo - $I''_{kE2Emax} = 6.05$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo - $I''_{kE2Emin} = 5.48$ [kA]

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Máximo (Pico) - $I_{pE2Emax} = 14.08$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo - $I''_{k1max} = 6$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo - $I''_{k1min} = 5.43$ [kA]

Curto-circuito Fase-Terra Máximo (Pico) - $I_{p1max} = 13.96$ [kA]

Cálculos efectuados segundo a norma IEC 60909-0

MATERIAL

Rede:

Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica - $S''_{kQmax} = 500$ [MVA]

Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica - $S''_{kQmin} = 500$ [MVA]

Tensão Estipulada - $Un_Q = 20$ [kV]

Razão entre a Resistência e a Reactância - $R_Q/X_Q = 0.1$

Razão entre a Reactância e a Impedância - $X_Q/Z_Q = 0.995$

Transformador(es) MT/BT:

Transformador MT/BT N° 1

Modelo: -

Fabricante: -

Potência Aparente Estipulada - $S_{rT} = 1000$ [kVA]

Tensão Estipulada (MT) - $Ur_{THV} = 20$ [kV]

Tensão Estipulada (BT) - $Ur_{TLV} = 0.4$ [kV]

Tensão de Curto-Circuito Estipulada - $uk_r = 6$ [%]

Perdas Totais à Corrente Estipulada - $P_{krT} = 15.6$ [kW]

Tipo de Ligação: DYn

Impedância do Neutro à Terra - $Z_n = 0$ [Ω]

Razão entre a Resistência Homopolar e Directa - $R(0)/R(1) = 1$

Razão entre a Reactância Homopolar e Directa - $X(0)/X(1) = 0.95$

Regulação de Tensão - $+p_T = 1$ [%]

Regulação de Tensão - $-p_T = 1$ [%]

Cabo(s) de ligação das células de MT ao(s) Transformador(es) MT/BT:

Cabo de ligação das células de MT ao Transformador MT/BT N° 1

Designação: -

Resistência Linear Máxima a 20°C - $R(20^\circ C) = 0.193$ [Ω/km]

Resistência à T_{máx} em CC - $R(1) = 0.2387$ [Ω/km]

Reactância Linear - $X(1) = 0.1285$ [Ω/km]

Resistência Homopolar a 20°C - $R_0(20^\circ C) = 0.193$ [Ω/km]

Resistência Homopolar à T_{máx} em CC - $R(0) = 0.2387$ [Ω/km]

Reactância Homopolar - $X(0) = 0.1285$ [Ω/km]

Comprimento - $L = 2.7$ [km]

Gerador(es) a Produzir na BT:

Gerador a Produzir na BT N° 1

Modelo: -

Fabricante: -

Potência Aparente Estipulada - $S_{rG} = 500$ [kVA]

Tensão Estipulada - $U_{rG} = 400$ [V]

Regulação de Tensão - $+p_G = 1$ [%]

Regulação de Tensão - $-p_G = 1$ [%]

Factor de Potência Estipulado - $\cos\phi_{rG} = 0.8$

Reactância Subtransitória Longitudinal Saturada - $x_d'' = 0.1293$ [p.u.]

Reactância Subtransitória Transversal Saturada - $x_q'' = 0.1293$ [p.u.]

Reactância Inversa Saturada - $x(2) = 0.1293$ [p.u.]

Reactância Homopolar - $x(0) = 0.0754$ [p.u.]

Tipo de Ligação: Y_n

Impedância do Neutro à Terra - $Z_n = 0.00531$ [Ω]

Anexo B

Exemplo Teste 1

B.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica

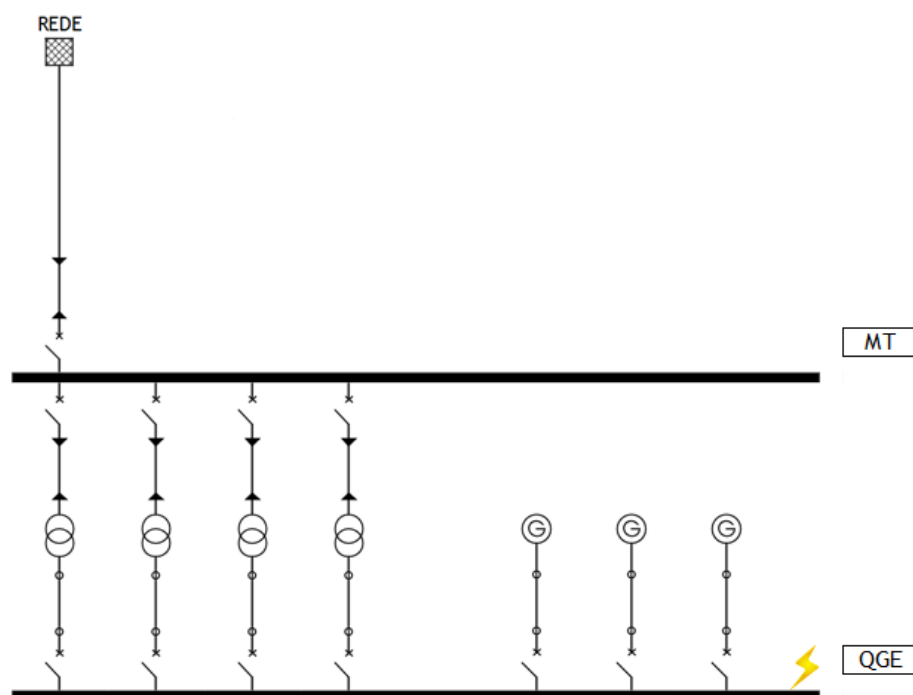


Figura B.1 - Esquema unifilar da instalação Eléctrica.

B.2 - Dados do Problema

Tabela B.1 - Dados do Problema.

Rede			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmax}	500	[MVA]
Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmin}	350	[MVA]
Tensão Nominal	U_{nQ}	15	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	0.1	-
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	0.995	-
Transformadores MT/BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	800	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	15	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.4	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	6	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	6	[kW]
Tipo de Ligação	DY_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	2.5	[%]
Geradores a produzir na BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rG}	1000	[kVA]
Tensão Estipulada	U_{rG}	400	[V]
Regulação de Tensão	$\pm p_G$	0.5	[%]
Factor de Potência Estipulado	$\cos \varphi_{rG}$	0.8	-
Reactância Subtransitória Longitudinal Saturada	x''_d	0.15	[p.u.]
Reactância Subtransitória Transversal Saturada	x''_q	0.19	[p.u.]
Reactância Inversa Saturada	$x_{(2)}$	0.19	[p.u.]
Reactância Homopolar	$x_{(0)}$	0.02	[p.u.]
Tipo de Ligação	Y_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]

B.3 - Impedâncias de Curto-Circuito do Equipamento Eléctrico

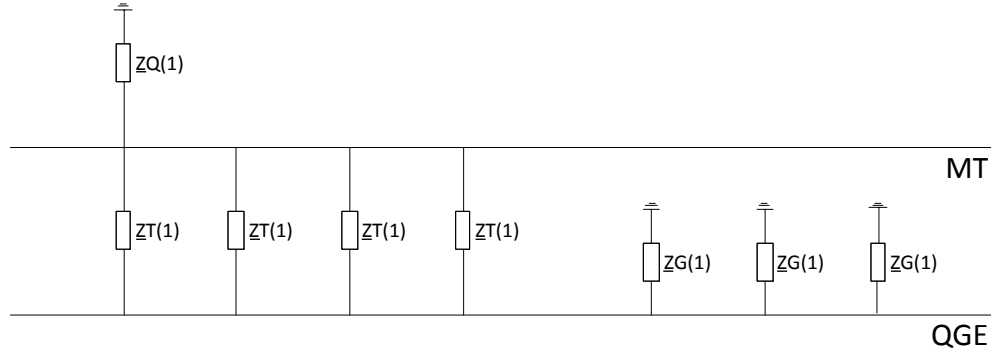


Figura B.2 - Esquema unifilar de impedâncias para os sistemas de sequência positiva (1) e negativa (2).

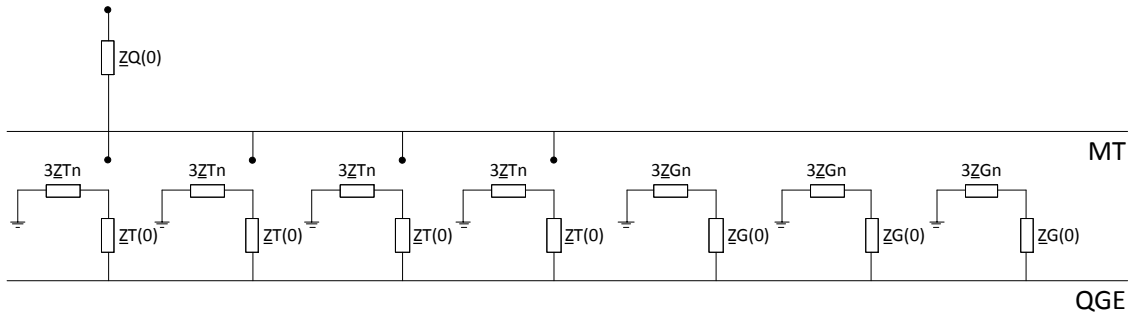


Figura B.3 - Esquema unifilar de impedâncias para o sistema de sequência zero (0).

B.3.1 - Rede

$$ZQ(1)_{max} = \frac{c_{max} \times U_{nQ}^2}{S''_{kQmax}} = \frac{1.1 \times (15 \times 10^3)^2}{500 \times 10^6} = 0.495 \text{ } [\Omega] \quad (B.1)$$

$$XQ(1)_{max} = \frac{ZQ(1)_{max}}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{0.495}{\sqrt{1 + 0.1^2}} = 0.4925 \text{ } [\Omega] \quad (B.2)$$

$$RQ(1)_{max} = XQ(1)_{max} \times 0.1 = 0.04925 \text{ } [\Omega] \quad (B.3)$$

$$\underline{ZQ}(1)_{max} = 0.04925 + j0.495 \text{ } [\Omega] \quad (B.4)$$

$$ZQ(1)_{min} = \frac{c_{min} \times U_{nQ}^2}{S''_{kQmin}} = \frac{1 \times (15 \times 10^3)^2}{350 \times 10^6} = 0.6429 \text{ } [\Omega] \quad (B.5)$$

$$XQ(1)_{min} = \frac{ZQ(1)_{min}}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{0.6429}{\sqrt{1 + 0.1^2}} = 0.6397 \text{ } [\Omega] \quad (B.6)$$

$$RQ(1)_{min} = XQ(1)_{min} \times 0.1 = 0.06397 \text{ } [\Omega] \quad (B.7)$$

$$\underline{Z}Q(1)_{min} = 0.06397 + j0.6397 [\Omega] \quad (B.8)$$

B.3.2 - Transformadores MT/BT

$$ZT(1) = \frac{u_{kr}}{100} \times \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \times \frac{(0.4 \times 10^3)^2}{800 \times 10^3} = 0.012 [\Omega] \quad (B.9)$$

$$RT(1) = \frac{P_{krT} \times U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{6 \times 10^3 \times (0.4 \times 10^3)^2}{(800 \times 10^3)^2} = 0.0015 [\Omega] \quad (B.10)$$

$$XT(1) = \sqrt{ZT(1)^2 - RT(1)^2} = 0.01191 [\Omega] \quad (B.11)$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100\% = \frac{6 \times 10^3}{800 \times 10^3} \times 100\% = 0.75 [\%] \quad (B.12)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 5.9529 [\%] \quad (B.13)$$

$$K_T = 0.95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0.6 \times u_{Xr}} = 0.95 \times \frac{1.05}{1 + 0.6 \times 5.9529} = 0.9631 \quad (B.14)$$

$$RTK(1) = RT(1) \times K_T = 0.001445 [\Omega] \quad (B.15)$$

$$XTK(1) = XT(1) \times K_T = 0.01147 [\Omega] \quad (B.16)$$

$$RTK(0) = RTK(1) \times 1 = 0.001445 [\Omega] \quad (B.17)$$

$$XTK(0) = XTK(1) \times 0.95 = 0.01089 [\Omega] \quad (B.18)$$

$$RTK(1)_{eq} = RTK(1)/4 = 0.0003612 [\Omega] \quad (B.19)$$

$$XTK(1)_{eq} = XTK(1)/4 = 0.002867 [\Omega] \quad (B.20)$$

$$\underline{ZTK}(1)_{eq} = 0.0003612 + j0.002867 [\Omega] \quad (B.21)$$

$$RTK(0)_{eq} = RTK(0)/4 = 0.0003612 [\Omega] \quad (B.22)$$

$$XTK(0)_{eq} = XTK(0)/4 = 0.002723 [\Omega] \quad (B.23)$$

$$\underline{ZTK}(0)_{eq} = 0.0003612 + j0.002723 [\Omega] \quad (B.24)$$

$$3 \times Z_n = 0 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.25})$$

B.3.3 - Rede + Transformadores MT/BT

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{15}{0.4} = 37.5 \quad (\text{B.26})$$

$$RQT(1)_{max} = RQ(1)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.0003962 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.27})$$

$$XQT(1)_{max} = XQ(1)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.003217 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.28})$$

$$\underline{ZQT}(1)_{max} = 0.0003962 + j0.003217 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.29})$$

$$RQT(1)_{min} = RQ(1)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.0004067 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.30})$$

$$XQT(1)_{min} = XQ(1)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.003322 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.31})$$

$$\underline{ZQT}(1)_{min} = 0.0004067 + j0.003322 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.32})$$

B.3.4 - Geradores a produzir na BT

$$XG(1) = x_d'' \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.15 \times \frac{400^2}{1000 \times 10^3} = 0.024 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.33})$$

$$RG(1) = 0.15 \times XG(1) = 0.0036 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.34})$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \times \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \times \sin \varphi_{rG}} = \frac{0.4 \times 10^3}{400} \times \frac{1.05}{1 + 0.15 \times \sin(\cos^{-1} 0.8)} = 0.9633 \quad (\text{B.35})$$

$$RGK(1) = RG(1) \times K_G = 0.003468 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.36})$$

$$XGK(1) = XG(1) \times K_G = 0.02312 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.37})$$

$$XG(2) = x_{(2)} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.19 \times \frac{400^2}{1000 \times 10^3} = 0.0304 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.38})$$

$$RG(2) = 0.15 \times XG(2) = 0.00456 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.39})$$

$$RGK(2) = RG(2) \times K_G = 0.004393 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.40})$$

$$XGK(2) = XG(2) \times K_G = 0.02928 [\Omega] \quad (B.41)$$

$$XG(0) = x_{(0)} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.02 \times \frac{400^2}{1000 \times 10^3} = 0.0032 [\Omega] \quad (B.42)$$

$$RG(0) = 0.15 \times XG(0) = 0.00048 [\Omega] \quad (B.43)$$

$$RGK(0) = RG(0) \times K_G = 0.0004624 [\Omega] \quad (B.44)$$

$$XGK(0) = XG(0) \times K_G = 0.003083 [\Omega] \quad (B.45)$$

$$RGK(1)eq = RGK(1)/3 = 0.001156 [\Omega] \quad (B.46)$$

$$XGK(1)eq = XGK(1)/3 = 0.007706 [\Omega] \quad (B.47)$$

$$\underline{ZGK}(1)eq = 0.001156 + j0.007706[\Omega] \quad (B.48)$$

$$RGK(2)eq = RGK(2)/3 = 0.001464 [\Omega] \quad (B.49)$$

$$XGK(2)eq = XGK(2)/3 = 0.009761 [\Omega] \quad (B.50)$$

$$\underline{ZGK}(2)eq = 0.001464 + j0.009761[\Omega] \quad (B.51)$$

$$RGK(0)eq = RGK(0)/3 = 0.0001541 [\Omega] \quad (B.52)$$

$$XGK(0)eq = XGK(0)/3 = 0.001028 [\Omega] \quad (B.53)$$

$$\underline{ZGK}(0)eq = 0.0001541 + j0.001028[\Omega] \quad (B.54)$$

B.4 - Curto-Circuitos

B.4.1 - Curto-Circuito Trifásico Inicial Simétrico (I''_k)

Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{kQTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)max|} = \frac{1.05 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)max|} = 74.81 [kA] \quad (B.55)$$

$$I''_{kQTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)min|} = \frac{0.95 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)min|} = 65.56 [kA] \quad (B.56)$$

Geradores a Produzir na BT

$$I''_{kGmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{GK}(1)eq|} = \frac{1.05 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{GK}(1)eq|} = 31.12 [kA] \quad (B.57)$$

$$I''_{kGmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{GK}(1)eq|} = \frac{0.95 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{GK}(1)eq|} = 28.15 [kA] \quad (B.58)$$

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo (I''_{kmax})

$$I''_{kmax} = I''_{kQTmax} + I''_{kGmax} = 105.93 [kA] \quad (B.59)$$

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo (I''_{kmin})

$$I''_{kmin} = I''_{kQTmin} + I''_{kGmin} = 93.72 [kA] \quad (B.60)$$

B.4.2 - Curto-Circuito Trifásico Simétrico Máximo - Pico (I_{pmax})Rede + Transformadores MT/BT

$$\frac{RQT(1)max}{XQT(1)max} = 0.12 \quad (B.61)$$

$$K_{QT} = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.70 \quad (B.62)$$

$$I_{pQTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{kQTmax} = 179.58 [kA] \quad (B.63)$$

Geradores a Produzir na BT

$$\frac{RGK(1)eq}{XGK(1)eq} = 0.15 \quad (B.64)$$

$$K_G = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.64 \quad (B.65)$$

$$I_{pGmax} = K_G \times \sqrt{2} \times I''_{kGmax} = 72.39 [kA] \quad (B.66)$$

$$I_{pmax} = I_{pQTmax} + I_{pGmax} = 251.96 [kA] \quad (B.67)$$

B.4.3 - Curto-Circuito Fase-Fase Inicial (I''_{k2})Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{k2QTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT}(1)max + \underline{Z}_{QT}(1)max|} = 64.79 [kA] \quad (B.68)$$

$$I''_{k2QTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{|\underline{ZQT}(1)min + \underline{ZQT}(1)min|} = 56.78 [kA] \quad (B.69)$$

Geradores a Produzir na BT

$$I''_{k2Gmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{ZGK}(1)eq + \underline{ZGK}(2)eq|} = 23.78 [kA] \quad (B.70)$$

$$I''_{k2Gmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{|\underline{ZGK}(1)eq + \underline{ZGK}(2)eq|} = 21.51 [kA] \quad (B.71)$$

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo (I''_{k2max})

$$I''_{k2max} = I''_{k2QTmax} + I''_{k2Gmax} = 88.57 [kA] \quad (B.72)$$

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo (I''_{k2min})

$$I''_{k2min} = I''_{k2QTmin} + I''_{k2Gmin} = 78,29 [kA] \quad (B.73)$$

B.4.4 - Curto-Circuito Fase-Fase Máximo - Pico (I_{p2max})

Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{p2QTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{k2QTmax} = 155.52 [kA] \quad (B.74)$$

Geradores a Produzir na BT

$$I_{p2Gmax} = K_G \times \sqrt{2} \times I''_{k2Gmax} = 55.31 [kA] \quad (B.75)$$

$$I_{p2max} = I_{p2QTmax} + I_{p2Gmax} = 210.83 [kA] \quad (B.76)$$

B.4.5 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Inicial (I''_{kE2E})

Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{kE2EQTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n \times |\underline{ZQT}(1)max|}{|\underline{ZQT}(1)max \times \underline{ZQT}(1)max + \underline{ZQT}(1)max \times \underline{ZTK}(0)eq + \underline{ZQT}(1)max \times \underline{ZTK}(0)eq|} \quad (B.77)$$

$$= 83.28 [kA]$$

$$I''_{kE2EQTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n \times |\underline{ZQT}(1)min|}{|\underline{ZQT}(1)min \times \underline{ZQT}(1)min + \underline{ZQT}(1)min \times \underline{ZTK}(0)eq + \underline{ZQT}(1)min \times \underline{ZTK}(0)eq|} \quad (B.78)$$

$$= 74.45 [kA]$$

Geradores a Produzir na BT

$$I''_{kE2EGmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n \times |\underline{ZGK}(2)eq|}{|\underline{ZGK}(1)eq \times \underline{ZGK}(2)eq + \underline{ZGK}(1)eq \times \underline{ZGK}(0)eq + \underline{ZGK}(2)eq \times \underline{ZGK}(0)eq|} \quad (B.79)$$

$$= 75.37 [kA]$$

$$I''_{kE2EGmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n \times |\underline{ZGK}(2)eq|}{|\underline{ZGK}(1)eq \times \underline{ZGK}(2)eq + \underline{ZGK}(1)eq \times \underline{ZGK}(0)eq + \underline{ZGK}(2)eq \times \underline{ZGK}(0)eq|} \quad (B.80)$$

$$= 68.19 [kA]$$

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo ($I''_{kE2Emax}$)

$$I''_{kE2Emax} = I''_{kE2EQTmax} + I''_{kE2EGmax} = 158.65 [kA] \quad (B.81)$$

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo ($I''_{kE2Emin}$)

$$I''_{kE2Emin} = I''_{kE2EQTmin} + I''_{kE2EGmin} = 142.64 [kA] \quad (B.82)$$

B.4.6 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Máximo - Pico ($I_{pE2Emax}$)Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{pE2EQTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{kE2EQTmax} = 199.89 [kA] \quad (B.83)$$

Geradores a Produzir na BT

$$I_{pE2EGmax} = K_G \times \sqrt{2} \times I''_{kE2EGmax} = 175.32 [kA] \quad (B.84)$$

$$I_{pE2Emax} = I_{pE2EQTmax} + I_{pE2EGmax} = 375.22 [kA] \quad (B.85)$$

B.4.7 - Curto-Circuito Fase-Terra Inicial (I''_{k1})Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{k1QTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n}{|\underline{ZQT}(1)max + \underline{ZQT}(1)max + \underline{ZTK}(0)eq|} = 78.82 [kA] \quad (B.86)$$

$$I''_{k1QTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n}{|\underline{ZQT}(1)min + \underline{ZQT}(1)min + \underline{ZTK}(0)eq|} = 69.72 [kA] \quad (B.87)$$

Geradores a Produzir na BT

$$I''_{k1Gmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n}{|\underline{ZGK}(1)eq + \underline{ZGK}(2)eq + \underline{ZGK}(0)eq|} = 38.90 [kA] \quad (B.88)$$

$$I''_{k1Gmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n}{|\underline{ZGK}(1)eq + \underline{ZGK}(2)eq + \underline{ZGK}(0)eq|} = 35.19 [kA] \quad (B.89)$$

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo (I''_{k1max})

$$I''_{k1max} = I''_{k1QTmax} + I''_{k1Gmax} = 117.72 [kA] \quad (B.90)$$

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo (I''_{k1min})

$$I''_{k1min} = I''_{k1QTmin} + I''_{k1Gmin} = 104.92 [kA] \quad (B.91)$$

B.4.8 - Curto-Circuito Fase-Terra Máximo - Pico (I_{p1max})Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{p1QTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{k1QTmax} = 189.19 [kA] \quad (B.92)$$

Geradores a Produzir na BT

$$I_{p1Gmax} = K_G \times \sqrt{2} \times I''_{k1Gmax} = 90.48 [kA] \quad (B.93)$$

$$I_{p1max} = I_{p1QTmax} + I_{p1Gmax} = 279.67 [kA] \quad (B.94)$$

Anexo C

Exemplo Teste 2

C.1 - Esquema Unifilar da instalação Eléctrica

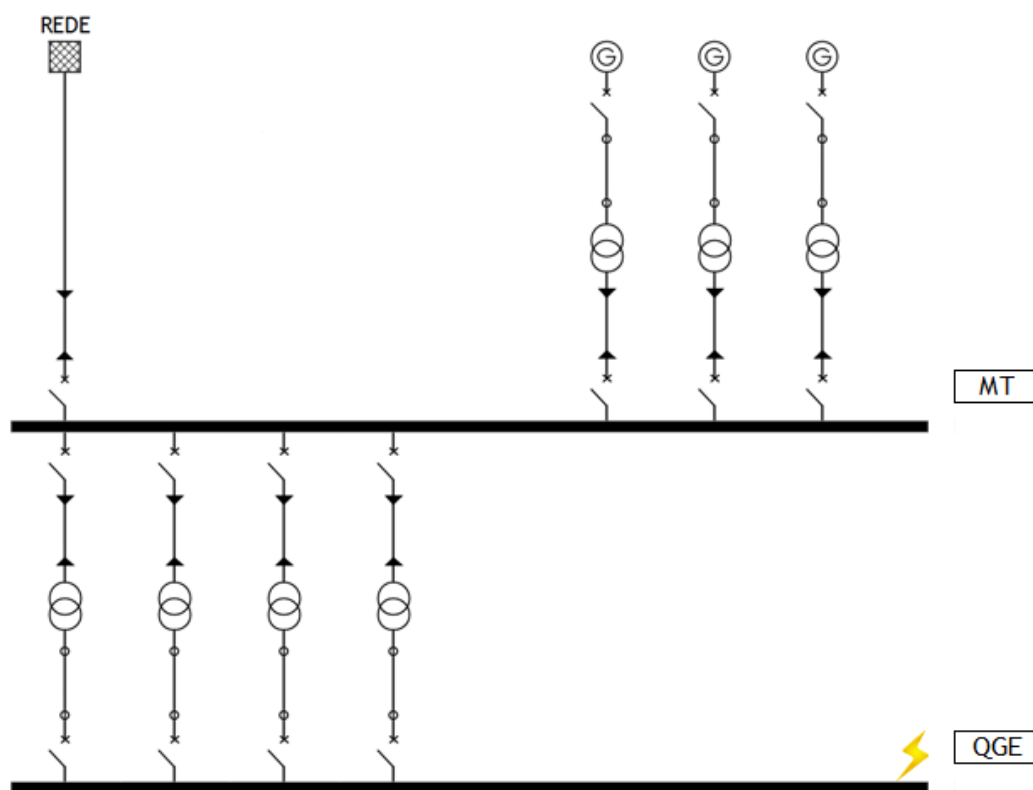


Figura C.1 - Esquema Unifilar da Instalação Eléctrica.

C.2 - Dados do Problema

Tabela C.1 - Dados do Problema.

Rede			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmax}	500	[MVA]
Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmin}	350	[MVA]
Tensão Nominal	U_{nQ}	15	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	0.1	-
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	0.995	-
Transformadores MT/BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	800	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	15	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.4	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	6	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	6	[kW]
Tipo de Ligação	DY_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	2.5	[%]
Geradores a produzir na MT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rG}	1000	[kVA]
Tensão Estipulada	U_{rG}	400	[V]
Regulação de Tensão	$\pm p_G$	0.5	[%]
Factor de Potência Estipulado	$\cos \varphi_{rG}$	0.8	-
Reactância Subtransitória Longitudinal Saturada	x''_d	0.15	[p.u.]
Reactância Subtransitória Transversal Saturada	x''_q	0.19	[p.u.]
Reactância Inversa Saturada	$x_{(2)}$	0.19	[p.u.]
Reactância Homopolar	$x_{(0)}$	0.02	[p.u.]
Tipo de Ligação	Y_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Transformadores BT/MT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	1250	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	15	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.4	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	6	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	9.5	[kW]
Tipo de Ligação	$Y_n D$	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-

Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	2.5	[%]
Tomadas de Regulação em Carga	Sim	-	-

C.3 - Impedâncias de Curto-Circuito do Equipamento Eléctrico

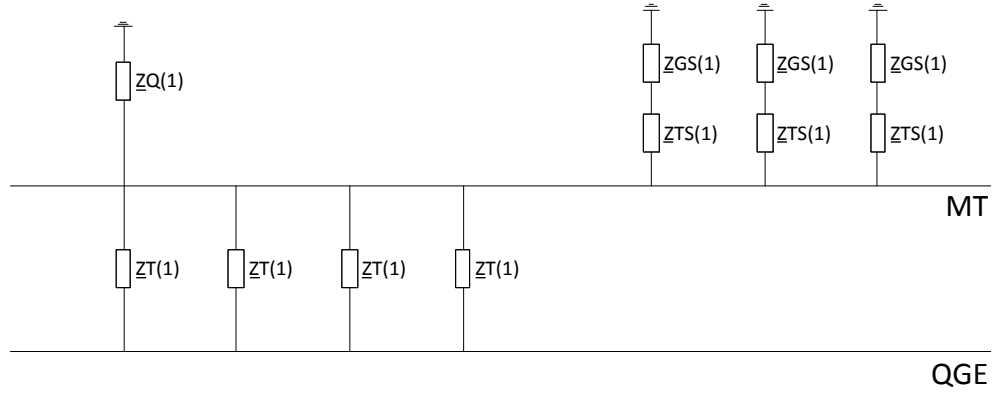


Figura C.2 - Esquema unifilar de impedâncias para os sistemas de sequência positiva (1) e negativa (2).

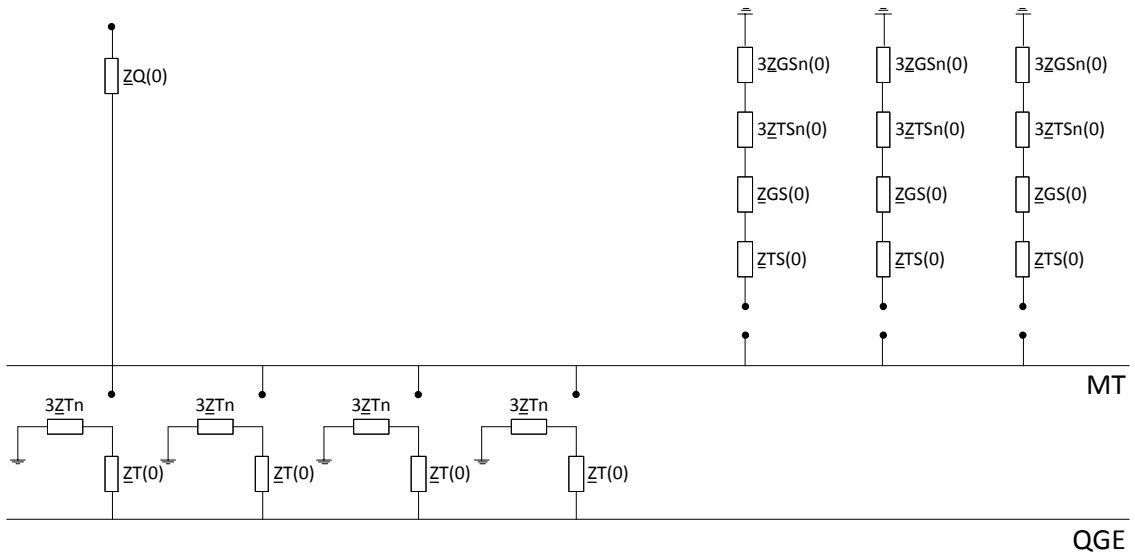


Figura C.3 - Esquema unifilar de impedâncias para o sistema de sequência zero (0).

C.3.1 - Rede

$$ZQ(1)_{max} = \frac{c_{max} \times U_{nQ}^2}{S''_{kQmax}} = \frac{1.1 \times (15 \times 10^3)^2}{500 \times 10^6} = 0.495 \text{ } [\Omega] \quad (C.1)$$

$$XQ(1)_{max} = \frac{ZQ(1)_{max}}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{0.495}{\sqrt{1 + 0.1^2}} = 0.4925 \text{ } [\Omega] \quad (C.2)$$

$$RQ(1)_{max} = XQ(1)_{max} \times 0.1 = 0.04925 \text{ } [\Omega] \quad (C.3)$$

$$\underline{ZQ}(1)_{max} = 0.04925 + j0.495 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.4})$$

$$ZQ(1)_{min} = \frac{c_{min} \times U_{nQ}^2}{S_{kQmin}''} = \frac{1 \times (15 \times 10^3)^2}{350 \times 10^6} = 0.6429 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.5})$$

$$XQ(1)_{min} = \frac{ZQ(1)_{min}}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{0.6429}{\sqrt{1 + 0.1^2}} = 0.6397 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.6})$$

$$RQ(1)_{min} = XQ(1)_{min} \times 0.1 = 0.06397 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.7})$$

$$\underline{ZQ}(1)_{min} = 0.06397 + j0.6397 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.8})$$

C.3.2 - Transformadores MT/BT

$$ZT(1) = \frac{u_{kr}}{100} \times \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \times \frac{(0.4 \times 10^3)^2}{800 \times 10^3} = 0.012 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.9})$$

$$RT(1) = \frac{P_{krT} \times U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{6 \times 10^3 \times (0.4 \times 10^3)^2}{(800 \times 10^3)^2} = 0.0015 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.10})$$

$$XT(1) = \sqrt{ZT(1)^2 - RT(1)^2} = 0.01191 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.11})$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100\% = \frac{6 \times 10^3}{800 \times 10^3} \times 100\% = 0.75 \text{ } [\%] \quad (\text{C.12})$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 5.9529 \text{ } [\%] \quad (\text{C.13})$$

$$K_T = 0.95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0.6 \times u_{Xr}} = 0.95 \times \frac{1.05}{1 + 0.6 \times 5.9529} = 0.9631 \quad (\text{C.14})$$

$$RTK(1) = RT(1) \times K_T = 0.001445 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.15})$$

$$XTK(1) = XT(1) \times K_T = 0.01147 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.16})$$

$$RTK(0) = RTK(1) \times 1 = 0.001445 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.17})$$

$$XTK(0) = XTK(1) \times 0.95 = 0.01089 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.18})$$

$$RTK(1)_{eq} = RTK(1)/4 = 0.0003612 \text{ } [\Omega] \quad (\text{C.19})$$

$$X_{TK(1)eq} = X_{TK(1)}/4 = 0.002867 \text{ } [\Omega] \quad (C.20)$$

$$\underline{Z}_{TK(1)eq} = 0.0003612 + j0.002867 \text{ } [\Omega] \quad (C.21)$$

$$R_{TK(0)eq} = R_{TK(0)}/4 = 0.0003612 \text{ } [\Omega] \quad (C.22)$$

$$X_{TK(0)eq} = X_{TK(0)}/4 = 0.002723 \text{ } [\Omega] \quad (C.23)$$

$$\underline{Z}_{TK(0)eq} = 0.0003612 + j0.002723 \text{ } [\Omega] \quad (C.24)$$

$$3 \times Z_n = 0 \text{ } [\Omega] \quad (C.25)$$

C.3.3 - Rede + Transformadores MT/BT

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{15}{0.4} = 37.5 \quad (C.26)$$

$$R_{QT(1)max} = R_{Q(1)max} \times \frac{1}{t_r^2} + R_{TK(1)eq} = 0.0003962 \text{ } [\Omega] \quad (C.27)$$

$$X_{QT(1)max} = X_{Q(1)max} \times \frac{1}{t_r^2} + X_{TK(1)eq} = 0.003217 \text{ } [\Omega] \quad (C.28)$$

$$\underline{Z}_{QT(1)max} = 0.0003962 + j0.003217 \text{ } [\Omega] \quad (C.29)$$

$$R_{QT(1)min} = R_{Q(1)min} \times \frac{1}{t_r^2} + R_{TK(1)eq} = 0.0004067 \text{ } [\Omega] \quad (C.30)$$

$$X_{QT(1)min} = X_{Q(1)min} \times \frac{1}{t_r^2} + X_{TK(1)eq} = 0.003322 \text{ } [\Omega] \quad (C.31)$$

$$\underline{Z}_{QT(1)min} = 0.0004067 + j0.003322 \text{ } [\Omega] \quad (C.32)$$

C.3.4 - Geradores a Produzir na MT

$$X_{GS(1)} = x_d'' \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.15 \times \frac{400^2}{1000 \times 10^3} = 0.024 \text{ } [\Omega] \quad (C.33)$$

$$R_{GS(1)} = 0.15 \times X_{GS(1)} = 0.0036 \text{ } [\Omega] \quad (C.34)$$

$$\underline{Z}_{GS(1)} = 0.0036 + j0.024 \text{ } [\Omega] \quad (C.35)$$

$$X_{GS(2)} = x_{(2)} \times \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.19 \times \frac{400^2}{1000 \times 10^3} = 0.0304 \text{ } [\Omega] \quad (C.36)$$

$$RGS(2) = 0.15 \times XGS(2) = 0.00456 [\Omega] \quad (C.37)$$

$$\underline{ZGS}(2) = 0.00456 + j0.0304 [\Omega] \quad (C.38)$$

C.3.5 - Transformadores BT/MT

$$ZTS(1) = \frac{u_{kr}}{100} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \times \frac{(15 \times 10^3)^2}{1250 \times 10^3} = 10.8 [\Omega] \quad (C.39)$$

$$RTS(1) = \frac{P_{krT} \times U_{rTHV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{9.5 \times 10^3 \times (15 \times 10^3)^2}{(1250 \times 10^3)^2} = 1.368 [\Omega] \quad (C.40)$$

$$XTS(1) = \sqrt{ZTS(1)^2 - RTS(1)^2} = 10.7130 [\Omega] \quad (C.41)$$

$$\underline{ZTS}(1) = 1.368 + j10.7130 [\Omega] \quad (C.42)$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100\% = \frac{9.5 \times 10^3}{1250 \times 10^3} \times 100\% = 0.76 [\%] \quad (C.43)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 5.9517 [\%] \quad (C.44)$$

C.3.6 - Grupos de Produção na MT

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - u_{Xr}| \times \sin \varphi_{rG}} = \frac{(15 \times 10^3)^2}{400^2} \times \frac{(0.4 \times 10^3)^2}{(15 \times 10^3)^2} \times \frac{1.05}{1 + |0.15 - 0.05952| \times \sin(\cos^{-1} 0.8)} = 0.9959 \quad (C.45)$$

$$RS(1) = K_S \times (RGS(1) \times t_r^2 + RTS(1)) = 6.4043 [\Omega] \quad (C.46)$$

$$XS(1) = K_S \times (XGS(1) \times t_r^2 + XTS(1)) = 44.2821 [\Omega] \quad (C.47)$$

$$RS(2) = K_S \times (RGS(2) \times t_r^2 + RTS(2)) = 7.7488 [\Omega] \quad (C.48)$$

$$XS(2) = K_S \times (XGS(2) \times t_r^2 + XTS(2)) = 53.2455 [\Omega] \quad (C.49)$$

$$RS(1)_{eq} = RS(1)/3 = 2.1348 [\Omega] \quad (C.50)$$

$$XS(1)_{eq} = XS(1)/3 = 14.7607 [\Omega] \quad (C.51)$$

$$\underline{ZS}(1)_{eq} = 2.1348 + j14.7607 [\Omega] \quad (C.52)$$

$$RS(2)_{eq} = RS(2)/3 = 2.5829 \text{ } [\Omega] \quad (C.53)$$

$$XS(2)_{eq} = XS(2)/3 = 17.7485 \text{ } [\Omega] \quad (C.54)$$

$$\underline{ZS}(2)_{eq} = 2.5829 + j17.7485 \text{ } [\Omega] \quad (C.55)$$

C.3.7 - Grupos de Produção na MT + Transformadores MT/BT

$$RST(1) = RS(1)_{eq} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.001879 \text{ } [\Omega] \quad (C.56)$$

$$XST(1) = XS(1)_{eq} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.01336 \text{ } [\Omega] \quad (C.57)$$

$$\underline{ZST}(1) = 0.001879 + j0.01336 \text{ } [\Omega] \quad (C.58)$$

$$RST(2) = RS(2)_{eq} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.002198 \text{ } [\Omega] \quad (C.59)$$

$$XST(2) = XS(2)_{eq} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.01549 \text{ } [\Omega] \quad (C.60)$$

$$\underline{ZST}(2) = 0.002198 + j0.01549 \text{ } [\Omega] \quad (C.61)$$

C.3.8 - Rede + Grupos de Produção na MT + Transformadores MT/BT

$$\underline{ZQS}(1)_{max} = \underline{ZQ}(1)_{max} // \underline{ZS}(1)_{eq} \quad (C.62)$$

$$RQS(1)_{max} = 0.04835 \text{ } [\Omega] \quad (C.63)$$

$$XQS(1)_{max} = 0.4767 \text{ } [\Omega] \quad (C.64)$$

$$\underline{ZQS}(1)_{min} = \underline{ZQ}(1)_{min} // \underline{ZS}(1)_{eq} \quad (C.65)$$

$$RQS(1)_{min} = 0.06244 \text{ } [\Omega] \quad (C.66)$$

$$XQS(1)_{min} = 0.6131 \text{ } [\Omega] \quad (C.67)$$

$$\underline{ZQS}(2)_{max} = \underline{ZQ}(1)_{max} // \underline{ZS}(2)_{eq} \quad (C.68)$$

$$RQS(2)_{max} = 0.04851 \text{ } [\Omega] \quad (C.69)$$

$$XQS(2)_{max} = 0.4793 \text{ } [\Omega] \quad (C.70)$$

$$\underline{Z}QS(2)_{min} = \underline{Z}Q(1)_{min} // \underline{Z}S(2)_{eq} \quad (C.71)$$

$$RQS(2)_{min} = 0.06271 \text{ } [\Omega] \quad (C.72)$$

$$XQS(2)_{min} = 0.6175 \text{ } [\Omega] \quad (C.73)$$

$$RQST(1)_{max} = RQS(1)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.0003955 \text{ } [\Omega] \quad (C.74)$$

$$XQST(1)_{max} = XQS(1)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.003206 \text{ } [\Omega] \quad (C.75)$$

$$\underline{Z}QST(1)_{max} = 0.0003955 + j0.003206 \text{ } [\Omega] \quad (C.76)$$

$$RQST(1)_{min} = RQS(1)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.0004056 \text{ } [\Omega] \quad (C.77)$$

$$XQST(1)_{min} = XQS(1)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.003303 \text{ } [\Omega] \quad (C.78)$$

$$\underline{Z}QST(1)_{min} = 0.0004056 + j0.003303 \text{ } [\Omega] \quad (C.79)$$

$$RQST(2)_{max} = RQS(2)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.0003957 \text{ } [\Omega] \quad (C.80)$$

$$XQST(2)_{max} = XQS(2)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.003207 \text{ } [\Omega] \quad (C.81)$$

$$\underline{Z}QST(2)_{max} = 0.0003957 + j0.003207 \text{ } [\Omega] \quad (C.82)$$

$$RQST(2)_{min} = RQS(2)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1)_{eq} = 0.0004058 \text{ } [\Omega] \quad (C.83)$$

$$XQST(2)_{min} = XQS(2)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1)_{eq} = 0.003306 \text{ } [\Omega] \quad (C.84)$$

$$\underline{Z}QST(2)_{min} = 0.0004058 + j0.003306 \text{ } [\Omega] \quad (C.85)$$

C.4 - Curto-Circuitos

C.4.1 - Curto-Circuito Trifásico Inicial Simétrico (I''_k)

Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{kQSTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QST}(1)_{max}|} = \frac{1.05 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QST}(1)_{max}|} = 75.08 [kA] \quad (C.86)$$

$$I''_{kQSTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QST}(1)_{min}|} = \frac{0.95 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QST}(1)_{min}|} = 65.93 [kA] \quad (C.87)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{kQTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QT}(1)_{max}|} = \frac{1.05 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QT}(1)_{max}|} = 74.81 [kA] \quad (C.88)$$

$$I''_{kQTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QT}(1)_{min}|} = \frac{0.95 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{QT}(1)_{min}|} = 65.56 [kA] \quad (C.89)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{kSTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{ST}(1)|} = \frac{1.05 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{ST}(1)|} = 17.97 [kA] \quad (C.90)$$

$$I''_{kSTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{ST}(1)|} = \frac{0.95 \times 0.4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_{ST}(1)|} = 16.26 [kA] \quad (C.91)$$

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo (I''_{kmax})

$$I''_{kmax} = I''_{kQSTmax} = 75.08 [kA] \quad (C.92)$$

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo (I''_{kmin})

$$I''_{kmin} = I''_{kQSTmin} = 65.93 [kA] \quad (C.93)$$

C.4.2 - Curto-Circuito Trifásico Simétrico Máximo - Pico (I_{pmax})

Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$\frac{R_{QST}(1)_{max}}{X_{QST}(1)_{max}} = 0.12 \quad (C.94)$$

$$K_{QST} = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.70 \quad (C.95)$$

$$I_{pQSTmax} = K_{QST} \times \sqrt{2} \times I''_{kQSTmax} = 180.15 [kA] \quad (C.96)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$\frac{RQT(1)max}{XQT(1)max} = 0.12 \quad (C.97)$$

$$K_{QT} = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.70 \quad (C.98)$$

$$I_{pQTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{kQTmax} = 179.58 [kA] \quad (C.99)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$\frac{RST(1)}{XST(1)} = 0.14 \quad (C.100)$$

$$K_{ST} = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.66 \quad (C.101)$$

$$I_{pSTmax} = K_{ST} \times \sqrt{2} \times I''_{kSTmax} = 42.25 [kA] \quad (C.102)$$

$$I_{pmax} = I_{pQSTmax} = 180.15 [kA] \quad (C.103)$$

C.4.3 - Curto-Circuito Fase-Fase Inicial (I''_{k2})

Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{k2QSTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QST(1)max} + \underline{Z}_{QST(2)max}|} = 65.00 [kA] \quad (C.104)$$

$$I''_{k2QSTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{QST(1)min} + \underline{Z}_{QST(2)min}|} = 57.07 [kA] \quad (C.105)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{k2QTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT(1)max} + \underline{Z}_{QT(2)max}|} = 64.79 [kA] \quad (C.106)$$

$$I''_{k2QTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT(1)min} + \underline{Z}_{QT(2)min}|} = 56.78 [kA] \quad (C.107)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{k2STmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{ST(1)} + \underline{Z}_{ST(2)}|} = 14.41 [kA] \quad (C.108)$$

$$I''_{k2STmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{ST(1)} + \underline{Z}_{ST(2)}|} = 13.04 [kA] \quad (C.109)$$

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo (I''_{k2max})

$$I''_{k2max} = I''_{k2QSTmax} = 65.00 [kA] \quad (C.110)$$

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo (I''_{k2min})

$$I''_{k2min} = I''_{k2QSTmin} = 57.07 [kA] \quad (C.111)$$

C.4.4 - Curto-Circuito Fase-Fase Máximo - Pico (I_{p2max})Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I_{p2QSTmax} = K_{QST} \times \sqrt{2} \times I''_{k2QSTmax} = 155.97 [kA] \quad (C.112)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{p2QTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{k2QTmax} = 155.52 [kA] \quad (C.113)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I_{p2STmax} = K_{ST} \times \sqrt{2} \times I''_{k2STmax} = 33.89 [kA] \quad (C.114)$$

$$I_{p2max} = I_{p2QSTmax} = 155.97 [kA] \quad (C.115)$$

C.4.5 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Inicial (I''_{kE2E})Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{kE2EQSTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n \times |\underline{Z}_{QST}(2)max|}{|\underline{Z}_{QST}(1)max \times \underline{Z}_{QST}(2)max + \underline{Z}_{QST}(1)max \times \underline{Z}_{TK}(0)eq + \underline{Z}_{QST}(2)max \times \underline{Z}_{TK}(0)eq|} \quad (C.116)$$

$$= 83.40 [kA]$$

$$I''_{kE2EQSTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n \times |\underline{Z}_{QST}(2)min|}{|\underline{Z}_{QST}(1)min \times \underline{Z}_{QST}(2)min + \underline{Z}_{QST}(1)min \times \underline{Z}_{TK}(0)eq + \underline{Z}_{QST}(2)min \times \underline{Z}_{TK}(0)eq|} \quad (C.117)$$

$$= 74.63 [kA]$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{kE2EQTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n \times |\underline{Z}_{QT}(1)max|}{|\underline{Z}_{QT}(1)max \times \underline{Z}_{QT}(1)max + \underline{Z}_{QT}(1)max \times \underline{Z}_{TK}(0)eq + \underline{Z}_{QT}(1)max \times \underline{Z}_{TK}(0)eq|} \quad (C.118)$$

$$= 83.28 [kA]$$

$$I''_{kE2EQTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n \times |\underline{Z}_{QT}(1)min|}{|\underline{Z}_{QT}(1)min \times \underline{Z}_{QT}(1)min + \underline{Z}_{QT}(1)min \times \underline{Z}_{TK}(0)eq + \underline{Z}_{QT}(1)min \times \underline{Z}_{TK}(0)eq|} \quad (C.119)$$

$$= 74.45 [kA]$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{kE2STmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n \times |\underline{Z}_{ST}(2)|}{|\underline{Z}_{ST}(1) \times \underline{Z}_{ST}(2) + \underline{Z}_{ST}(1) \times \underline{Z}_{TK}(0)eq + \underline{Z}_{ST}(2) \times \underline{Z}_{TK}(0)eq|} = 39.09 [kA] \quad (C.120)$$

$$I''_{kE2ESTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n \times |\underline{Z}_{ST}(2)|}{|\underline{Z}_{ST}(1) \times \underline{Z}_{ST}(2) + \underline{Z}_{ST}(1) \times \underline{Z}_{TK}(0)eq + \underline{Z}_{ST}(2) \times \underline{Z}_{TK}(0)eq|} = 35.36 [kA] \quad (C.121)$$

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo ($I''_{kE2Emax}$)

$$I''_{kE2Emax} = I''_{kE2EQSTmax} = 83.40 [kA] \quad (C.122)$$

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo ($I''_{kE2Emin}$)

$$I''_{kE2Emin} = I''_{kE2EQSTmin} = 74.63 [kA] \quad (C.123)$$

C.4.6 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Máximo - Pico ($I_{pE2Emax}$)

Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I_{pE2EQSTmax} = K_{QST} \times \sqrt{2} \times I''_{kE2EQSTmax} = 200.13 [kA] \quad (C.124)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{pE2EQTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{kE2EQTmax} = 199.89 [kA] \quad (C.125)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I_{pE2ESTmax} = K_{ST} \times \sqrt{2} \times I''_{kE2ESTmax} = 91.91 [kA] \quad (C.126)$$

$$I_{pE2Emax} = I_{pE2EQSTmax} = 200.13 [kA] \quad (C.127)$$

C.4.7 - Curto-Circuito Fase-Terra Inicial (I''_{k1})

Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{k1QSTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QST}(1)_{max} + \underline{Z}_{QST}(2)_{max} + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 79.00 [kA] \quad (C.128)$$

$$I''_{k1QSTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{QST}(1)_{min} + \underline{Z}_{QST}(2)_{min} + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 69.98 [kA] \quad (C.129)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{k1QTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT}(1)_{max} + \underline{Z}_{QT}(2)_{max} + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 78.82 [kA] \quad (C.130)$$

$$I''_{k1QTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT}(1)_{min} + \underline{Z}_{QT}(2)_{min} + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 69.72 [kA] \quad (C.131)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I''_{k1STmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{ST}(1) + \underline{Z}_{ST}(2) + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 22.82 [kA] \quad (C.132)$$

$$I''_{k1STmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{ST}(1) + \underline{Z}_{ST}(2) + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 20.64 [kA] \quad (C.133)$$

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo (I''_{k1max})

$$I''_{k1max} = I''_{k1QSTmax} = 79.00 [kA] \quad (C.134)$$

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo (I''_{k1min})

$$I''_{k1min} = I''_{k1QSTmin} = 69.98 [kA] \quad (C.135)$$

C.4.8 - Curto-Circuito Fase-Terra Máximo - Pico (I_{p1max})

Rede + Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I_{p1QSTmax} = K_{QST} \times \sqrt{2} \times I''_{k1QSTmax} = 189.56 [kA] \quad (C.136)$$

Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{p1QTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{k1QTmax} = 189.19 [kA] \quad (C.137)$$

Grupos de Produção na MT+ Transformadores MT/BT

$$I_{p1STmax} = K_{ST} \times \sqrt{2} \times I''_{k1STmax} = 53.65 [kA] \quad (C.138)$$

$$I_{p1max} = I_{p1QSTmax} = 189.56 [kA] \quad (C.139)$$

Anexo D

Exemplo Teste 3

D.1 - Esquema Unifilar da instalação Eléctrica

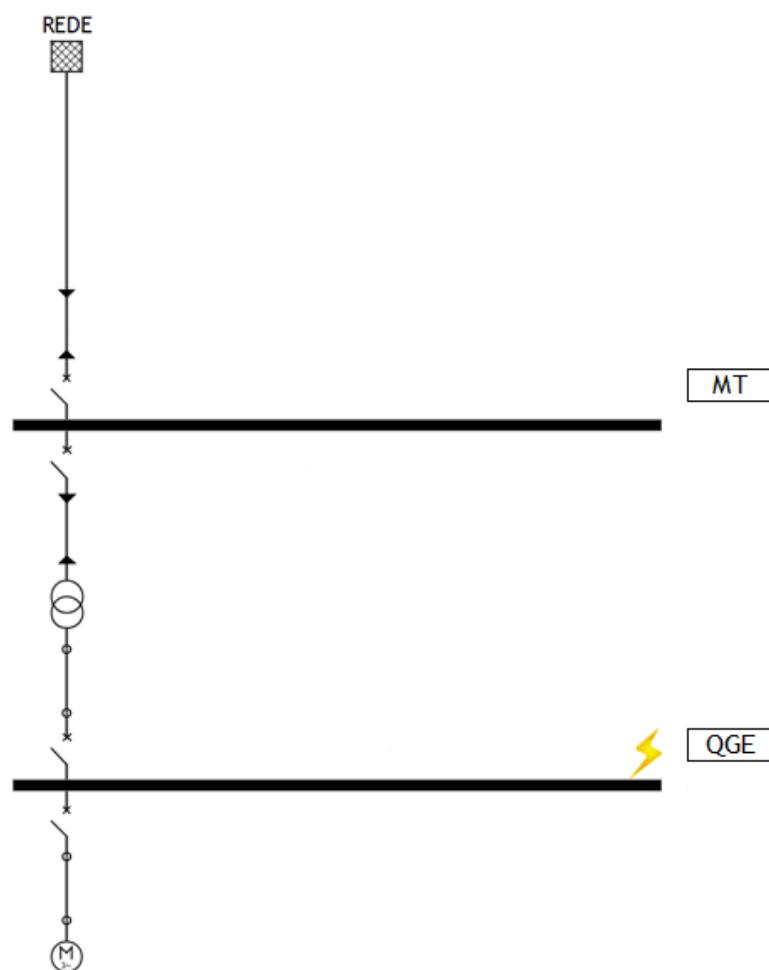


Figura D.1 - Esquema Unifilar da instalação Eléctrica.

D.2 - Dados do Problema

Tabela D.1 - Dados do Problema.

Rede			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Máxima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmax}	150	[MVA]
Potência Mínima de Curto-Circuito Inicial Simétrica	S''_{kQmin}	100	[MVA]
Tensão Nominal	U_{nQ}	10	[kV]
Razão entre a Resistência e a Reactância	R_Q/X_Q	0.1	-
Razão entre a Reactância e a Impedância	X_Q/Z_Q	0.995	-
Transformador MT/BT			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Aparente Estipulada	S_{rT}	400	[kVA]
Tensão Estipulada (MT)	U_{rTHV}	10	[kV]
Tensão Estipulada (BT)	U_{rTLV}	0.42	[kV]
Tensão de Curto-Circuito Estipulada	u_{kr}	4	[%]
Perdas Totais à Corrente Estipulada	P_{krT}	4.375	[kW]
Tipo de Ligação	DY_n	-	-
Impedância do Neutro à Terra	Z_n	0	[Ω]
Razão entre a Resistência Homopolar e Directa	$R_{(0)}/R_{(1)}$	1	-
Razão entre a Reactância Homopolar e Directa	$X_{(0)}/X_{(1)}$	0.95	-
Regulação de Tensão	$\pm p_T$	5	[%]
Motor Assíncrono			
Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Estipulada	P_{rM}	55	[kW]
Tensão Estipulada	U_{rM}	400	[V]
Rendimento Estipulado	η_r	95.3	[%]
Factor de Potência Estipulado	$\cos \varphi_{rM}$	0.86	-
Razão entre a Corrente de Arranque e Estipulada	I_{LR}/I_{rM}	7.9	-
Velocidade Estipulada	n_r	1480	[rot/min]
Par de Pólos	p	2	-

D.3 - Impedâncias de Curto-Circuito do Equipamento Eléctrico

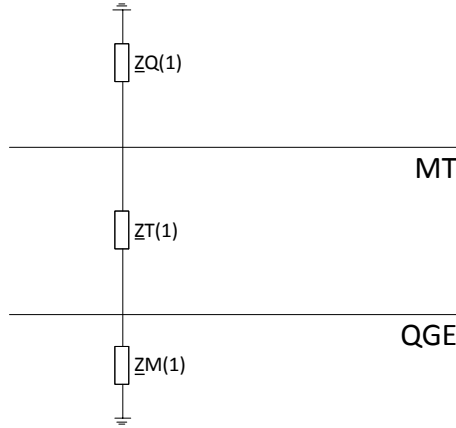


Figura D.2 - Esquema unifilar de impedâncias para os sistemas de seqüência positiva (1) e negativa (2).

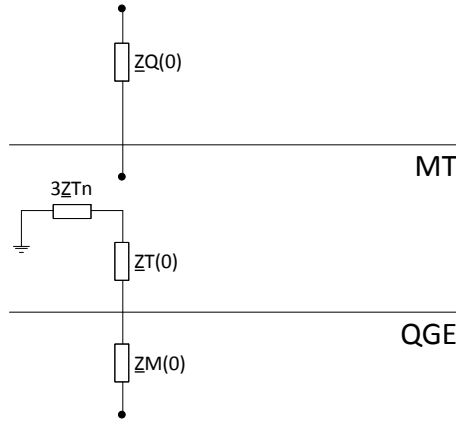


Figura D.3 - Esquema unifilar de impedâncias para o sistema de seqüência zero (0).

D.3.1 - Rede

$$ZQ(1)_{max} = \frac{c_{max} \times U_{nQ}^2}{S''_{kQmax}} = \frac{1.1 \times (10 \times 10^3)^2}{150 \times 10^6} = 0.7333 \text{ } [\Omega] \quad (D.1)$$

$$XQ(1)_{max} = \frac{ZQ(1)_{max}}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{0.7333}{\sqrt{1 + 0.1^2}} = 0.7297 \text{ } [\Omega] \quad (D.2)$$

$$RQ(1)_{max} = XQ(1)_{max} \times 0.1 = 0.07297 \text{ } [\Omega] \quad (D.3)$$

$$\underline{Z}Q(1)_{max} = 0.07297 + j0.7297 \text{ } [\Omega] \quad (D.4)$$

$$ZQ(1)_{min} = \frac{c_{min} \times U_{nQ}^2}{S''_{kQmin}} = \frac{1 \times (10 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 1 \text{ } [\Omega] \quad (D.5)$$

$$XQ(1)_{min} = \frac{ZQ(1)_{min}}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1^2}} = 0.9950 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.6})$$

$$RQ(1)_{min} = XQ(1)_{min} \times 0.1 = 0.09950 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.7})$$

$$\underline{ZQ}(1)_{min} = 0.09950 + j0.9950 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.8})$$

D.3.2 - Transformador MT/BT

$$ZT(1) = \frac{u_{kr}}{100} \times \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{4}{100} \times \frac{(0.42 \times 10^3)^2}{400 \times 10^3} = 0.01764 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.9})$$

$$RT(1) = \frac{P_{krT} \times U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{4.375 \times 10^3 \times (0.42 \times 10^3)^2}{(400 \times 10^3)^2} = 0.004823 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.10})$$

$$XT(1) = \sqrt{ZT(1)^2 - RT(1)^2} = 0.01697 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.11})$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100\% = \frac{4.375 \times 10^3}{400 \times 10^3} \times 100\% = 1.09375 \text{ } [\%] \quad (\text{D.12})$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 3.8476 \text{ } [\%] \quad (\text{D.13})$$

$$K_T = 0.95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0.6 \times u_{Xr}} = 0.95 \times \frac{1.05}{1 + 0.6 \times 3.8476} = 0.9750 \quad (\text{D.14})$$

$$RTK(1) = RT(1) \times K_T = 0.004703 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.15})$$

$$XTK(1) = XT(1) \times K_T = 0.01654 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.16})$$

$$\underline{ZTK}(1) = 0.004703 + j0.01654 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.17})$$

$$RTK(0) = RTK(1) \times 1 = 0.004703 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.18})$$

$$XTK(0) = XTK(1) \times 0.95 = 0.01572 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.19})$$

$$\underline{ZTK}(0) = 0.004703 + j0.01572 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.20})$$

$$3 \times Z_n = 0 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.21})$$

D.3.3 - Rede + Transformador MT/BT

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{10}{0.42} = 23.8095 \quad (D.22)$$

$$RQT(1)_{max} = RQ(1)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1) = 0.004832 \text{ } [\Omega] \quad (D.23)$$

$$XQT(1)_{max} = XQ(1)_{max} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1) = 0.01783 \text{ } [\Omega] \quad (D.24)$$

$$\underline{ZQT}(1)_{max} = 0.004832 + j0.01783 \text{ } [\Omega] \quad (D.25)$$

$$RQT(1)_{min} = RQ(1)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + RTK(1) = 0.004878 \text{ } [\Omega] \quad (D.26)$$

$$XQT(1)_{min} = XQ(1)_{min} \times \frac{1}{t_r^2} + XTK(1) = 0.01830 \text{ } [\Omega] \quad (D.27)$$

$$\underline{ZQT}(1)_{min} = 0.004878 + j0.01830 \text{ } [\Omega] \quad (D.28)$$

D.3.4 - Motor Assíncrono

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\eta_r \times \cos \varphi_{rM}} = \frac{55 \times 10^3}{0.953 \times 0.86} = 67,11 \text{ } [\text{kVA}] \quad (D.29)$$

$$ZM(1) = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{7.9} \times \frac{400^2}{67,11 \times 10^3} = 0.3018 \text{ } [\Omega] \quad (D.30)$$

$$XM(1) = \frac{ZM(1)}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} = \frac{0.3018}{\sqrt{1 + 0.42^2}} = 0.2783 \text{ } [\Omega] \quad (D.31)$$

$$RM(1) = 0.42 \times XM(1) = 0.1169 \text{ } [\Omega] \quad (D.32)$$

$$\underline{ZM}(1) = 0.1169 + j0.2783 \text{ } [\Omega] \quad (D.33)$$

D.4 - Curto-Circuitos

D.4.1 - Curto-Circuito Trifásico Inicial Simétrico (I_k'')

Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{kQTmax}'' = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)_{max}|} = \frac{1.05 \times 0.42 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)_{max}|} = 13.78 \text{ } [kA] \quad (D.34)$$

$$I_{kQTmin}'' = \frac{c_{min} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)_{min}|} = \frac{0.95 \times 0.42 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{ZQT}(1)_{min}|} = 12.16 \text{ } [kA] \quad (D.35)$$

Motor Assíncrono

$$I''_{kMmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_M(1)|} = \frac{1.05 \times 0.42 \times 10^3}{\sqrt{3} \times |\underline{Z}_M(1)|} = 0.84 [kA] \quad (D.36)$$

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Máximo (I''_{kmax})

$$I''_{kmax} = I''_{kQTmax} + I''_{kMmax} = 14.63 [kA] \quad (D.37)$$

Curto-circuito Trifásico Inicial Simétrico Mínimo (I''_{kmin})

$$I''_{kmin} = I''_{kQTmin} = 12.16 [kA] \quad (D.38)$$

D.4.2 - Curto-Circuito Trifásico Simétrico Máximo - Pico (I_{pmax})Rede + Transformadores MT/BT

$$\frac{R_{QT(1)max}}{X_{QT(1)max}} = 0.27 \quad (D.39)$$

$$K_{QT} = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.45 \quad (D.40)$$

$$I_{pQTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{kQTmax} = 28.35 [kA] \quad (D.41)$$

Motor Assíncrono

$$\frac{R_M(1)}{X_M(1)} = 0.42 \quad (D.42)$$

$$K_M = 1.02 + 0.98e^{-3 \times (R/X)} = 1.30 \quad (D.43)$$

$$I_{pMmax} = K_M \times \sqrt{2} \times I''_{kMmax} = 1.55 [kA] \quad (D.44)$$

$$I_{pmax} = I_{pQTmax} + I_{pMmax} = 29.90 [kA] \quad (D.45)$$

D.4.3 - Curto-Circuito Fase-Fase Inicial (I''_{k2})Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{k2QTmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT(1)max} + \underline{Z}_{QT(1)max}|} = 11.94 [kA] \quad (D.46)$$

$$I''_{k2QTmin} = \frac{c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT(1)min} + \underline{Z}_{QT(1)min}|} = 10.53 [kA] \quad (D.47)$$

Motor Assíncrono

$$I''_{k2Mmax} = \frac{c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}M(1) + \underline{Z}M(1)|} = 0.73 [kA] \quad (D.48)$$

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Máximo (I''_{k2max})

$$I''_{k2max} = I''_{k2QTmax} + I''_{k2Mmax} = 12.67 [kA] \quad (D.49)$$

Curto-circuito Fase-Fase Inicial Mínimo (I''_{k2min})

$$I''_{k2min} = I''_{k2QTmin} = 10.53 [kA] \quad (D.50)$$

D.4.4 - Curto-Circuito Fase-Fase Máximo - Pico (I_{p2max})Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{p2QTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{k2QTmax} = 24.56 [kA] \quad (D.51)$$

Motor Assíncrono

$$I_{p2Mmax} = K_M \times \sqrt{2} \times I''_{k2Mmax} = 1.34 [kA] \quad (D.52)$$

$$I_{p2max} = I_{p2QTmax} + I_{p2Mmax} = 25.90 [kA] \quad (D.53)$$

D.4.5 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Inicial (I''_{kE2E})Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{kE2EQTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n \times |\underline{Z}QT(1)max|}{|\underline{Z}QT(1)max \times \underline{Z}QT(1)max + \underline{Z}QT(1)max \times \underline{Z}TK(0)eq + \underline{Z}QT(1)max \times \underline{Z}TK(0)eq|} \quad (D.54)$$

$$= 14.90 [kA]$$

$$I''_{kE2EQTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n \times |\underline{Z}QT(1)min|}{|\underline{Z}QT(1)min \times \underline{Z}QT(1)min + \underline{Z}QT(1)min \times \underline{Z}TK(0)eq + \underline{Z}QT(1)min \times \underline{Z}TK(0)eq|} \quad (D.55)$$

$$= 13.36 [kA]$$

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Máximo ($I''_{kE2Emax}$)

$$I''_{kE2Emax} = I''_{kE2EQTmax} = 14.90 [kA] \quad (D.56)$$

Curto-circuito Fase-Fase-Terra Inicial Mínimo ($I''_{kE2Emin}$)

$$I''_{kE2Emin} = I''_{kE2EQTmin} = 13.36 [kA] \quad (D.57)$$

D.4.6 - Curto-Circuito Fase-Fase-Terra Máximo - Pico ($I_{pE2Emax}$)Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{pE2EQTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{kE2EQTmax} = 30.64 [kA] \quad (D.58)$$

$$I_{pE2Emax} = I_{pE2EQTmax} = 30.64 [kA] \quad (D.59)$$

D.4.7 - Curto-Circuito Fase-Terra Inicial (I''_{k1})Rede + Transformadores MT/BT

$$I''_{k1QTmax} = \frac{\sqrt{3} \times c_{max} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT}(1)_{max} + \underline{Z}_{QT}(1)_{max} + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 14.32 [kA] \quad (D.60)$$

$$I''_{k1QTmin} = \frac{\sqrt{3} \times c_{min} \times U_n}{|\underline{Z}_{QT}(1)_{min} + \underline{Z}_{QT}(1)_{min} + \underline{Z}_{TK}(0)_{eq}|} = 12.73 [kA] \quad (D.61)$$

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Máximo (I''_{k1max})

$$I''_{k1max} = I''_{k1QTmax} = 14.32 [kA] \quad (D.62)$$

Curto-circuito Fase-Terra Inicial Mínimo (I''_{k1min})

$$I''_{k1min} = I''_{k1QTmin} = 12.73 [kA] \quad (D.63)$$

D.4.8 - Curto-Circuito Fase-Terra Máximo - Pico (I_{p1max})Rede + Transformadores MT/BT

$$I_{p1QTmax} = K_{QT} \times \sqrt{2} \times I''_{k1QTmax} = 29.46 [kA] \quad (D.64)$$

$$I_{p1max} = I_{p1QTmax} = 29.46 [kA] \quad (D.65)$$